



Nuno Eurico de Sousa Lage

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Estudo do comportamento de ancoragens de pré-esforço por aderência

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Estruturas

Orientador: Doutora Carla Alexandra da Cruz Marchão,
Professora Auxiliar, FCT/UNL
Coorientador: Doutora Ana Sofia Louro, Bolseira de
Pós-Doutoramento, LNEC

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa G. Santana, Professora Auxiliar,
FCT/UNL
Arguente: Doutor Válder J. G. Lúcio, Professor Associado, FCT/UNL
Vogal: Doutora Carla Alexandra da Cruz Marchão, Professora
Auxiliar, FCT/UNL

Dissertação elaborada ao abrigo do protocolo FCT - LNEC



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Junho 2018

“Copyright” Nuno Eurico de Sousa Lage, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

The goal of education is the advancement of knowledge and the dissemination of truth. (John F. Kennedy)

Agradecimentos

Este trabalho não seria possível sem um conjunto de esforço, dedicação e disponibilidade de várias partes. Expresso aqui o meu profundo agradecimentos a todas as partes envolvidas neste longo processo que contribuiu significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Quero agradecer especialmente à Professora Carla Marchão sem a qual esta proposta de estudo não existiria na minha esfera, por sempre ter confiado em mim e por estar sempre disponível para o que fosse necessário. Quero exprimir também um agradecimento muito especial à Professora e Bolseira de Pós-Doutoramento no LNEC, Ana Sofia Louro, pois sem o seu acompanhamento este trabalho não teria a presente forma. O seu conhecimento e visão foram fundamentais para a redação deste trabalho, bem como para a melhor preparação e execução dos ensaios. Agradeço ainda a constante disponibilidade, quer do laboratório quer pessoal, e horas extras dedicadas inteiramente a mim.

Considero ainda fulcrais, para este trabalho, o envolvimento da aluna de Doutoramento Helisa Muhaj, que sempre me apoiou quer na preparação dos ensaios, nos ensaios propriamente ditos, quer na análise dos dados e sugestões sempre úteis. Também a indispensável ajuda do técnico de laboratório no LNEC Paulo Marques com o qual foi possível adaptar o sistema de ensaio ao pretendido, calibrar instrumentos e a ajuda no manuseamento de equipamentos. A sua calma e disponibilidade foram muito importantes no desenrolar deste estudo.

Exprimo também um agradecimento às várias entidades envolvidas, quer pelo fornecimento de materiais quer pela disponibilização de equipamentos e espaços totalmente gratuitos. A CONCREMAT forneceu o betão, armaduras e cofragens, à VSL pelo fornecimento dos cordões de aço de alta resistência, à HILTI pelo fornecimento da resina, da pistola de injeção, outros equipamentos utilizados no processo e pela constante disponibilidade. A SIKA também disponibilizou uma argamassa de reparação.

O acordo entre a FCT-UNL e o LNEC para a realização de trabalhos em conjunto foi também fundamental para o desenvolvimento do trabalho nos moldes em que se encontra. Este acordo é fruto de anos de trabalho com objetivos que se cruzam e um meio de desenvolvimento para ambas as entidades. Que continuem o bom trabalho e sejam dadas cada vez mais oportunidades a alunos e profissionais de trabalharem em conjunto.

Finalmente, e não menos importante, deixo um agradecimento muito especial à minha mãe, Maria Cristina Borges de Sousa, pelo seu excelente exemplo de amor, vontade, postura e dedicação a tudo o que se entrega, capaz por isso de mobilizar tudo e todos, incluindo a minha inércia. Agradeço ainda a constante dedicação e apoio da minha família, sempre muito presente permitindo a minha liberdade e exigindo também a minha responsabilidade. Ainda quero agradecer à Marina Janardo a constante preocupação e apoio, e nunca me deixar desistir durante este processo, que como todos sabemos tem os seus altos e baixos.

Agradeço do fundo do coração a todos os que me apoiaram a dar este passo tão importante, quer por estarem disponíveis para mim quer por me ajudarem mais diretamente. Amigos e colegas, Professores e técnicos que me acompanharam neste longo percurso académico e de crescimento pessoal, sem as quais o meu percurso, pelo qual tenho tanto apreço, não seria o mesmo, o meu muito obrigado.

Resumo

As ancoragens pós-instaladas têm tido uma aplicação crescente nas últimas décadas e podem ser observadas em estruturas existentes durante a execução de métodos de reforço. As ancoragens pós-instaladas apresentam vantagens na instalação, podendo ser instaladas em espaços estreitos, instalação em vários elementos, na presença de água etc. No entanto, na literatura não existem muitos ensaios relativos a sistemas de ancoragens aderentes com recurso a cordões de aço de pré-esforço.

O presente trabalho visa investigar o comportamento de cordões de aço pós-tensionados, inseridos em provetes de betão armado e ensaiados num regime de carregamento monotónico e cíclico de modo a que seja possível analisar o seu comportamento em função de uma determinada ação imposta. A escolha de cordões de aço de pré-esforço para as ancoragens em estudo, em detrimento do uso de armadura ordinária ou varões roscados, deve-se ao facto de os cordões de pré-esforço possuírem uma capacidade resistente superior, sendo possível mobilizar maiores cargas, tirando partido da maior capacidade resistente. Como material de ligação utilizou-se uma resina époxi, geralmente aplicada em ancoragens com varões de armadura ordinária, para fixações pós instaladas.

Foram ensaiados dez modelos, seis em regime monotónico e quatro em regime cíclico. Durante a realização de cada um dos ensaios registaram-se a tensão de aderência e o escorregamento do cordão, bem como o deslocamento do cabeçote móvel do sistema de ensaio. Os resultados obtidos foram comparados com as normas existentes e com outros resultados de investigações, com ensaios semelhantes, encontrados na literatura portuguesa e estrangeira. As características dos provetes e as condições de ensaio foram definidas de modo a corretamente representar as condições de serviço no reforço. No âmbito do doutoramento realizado por Helisa Muhaj estes resultados serão utilizados no desenvolvimento de um método de reforço sísmico de vigas de betão armado onde as fixações serão asseguradas por esta solução de ancoragem aderente.

Palavras chave

Ancoragem adesiva; Aderência; Reforço sísmico; Resina; Ensaio monotónico; Ensaio cíclico

Abstract

Post-installed anchorages have had a growing application in the last decades. They may be found in existing structures during the execution of reinforcement methods. Post-installed anchorages are very viable and easy in installation, they can be installed in various cases: narrow space, installation in several elements, or in the presence of water, etc. However, in literature there are not many tests with bonded post-tensioning steel strands acting as an anchorage system.

The objective of this study is to investigate the behaviour of post-tensioning steel strands imbedded in reinforced concrete specimens under monotonic and cyclic loading history. The choice of prestressing steel strands for the anchorages under study, to the detriment of the use of ordinary reinforcement, steel bars or threaded rods, is due to the fact that the strands have a superior resistant capacity, being able to mobilize higher loads, taking advantage of the higher resistant capacity. The bonding material is an epoxy resin that is generally used for post-installed anchorages that usually consist in threaded rods or normal reinforcing steel rebars.

Ten specimens were tested, six monotonic and four cyclic loading tests. The characteristic loads (adhesion and maximal load) and the strand slip have been monitored during the tests and further evaluations have been carried out. The results have been compared to existing Codes and other similar investigation results found in literature. The characteristics of specimens and the testing conditions were defined to represent the conditions during the strengthening of beams. In the scope of the PhD carried out by Helisa Muhaj these results are going to be used in the development of a seismic strengthening method of reinforced concrete beams where the anchorages will be assured by this bonding solution.

Keywords:

Adhesive anchorage; adhesion; seismic reinforcement; resin; monotonic and cyclic test

Índice

Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xix
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da dissertação	2
2 Estado da Arte	3
2.1 Introdução	3
2.2 Trabalhos realizados por outros autores	3
2.3 Pré-esforço	4
2.4 Aderência	7
2.4.1 Adesão	8
2.4.2 Atrito e acção mecânica	9
2.4.3 Outros fatores que influenciam a aderência	11
2.5 Análise do comportamento	12
2.5.1 Comprimentos de referência	13

2.5.2	Tensões de aderência	16
2.5.3	Tensões transversais na ancoragem	19
2.5.4	Modos de rotura	20
3	Programa experimental	21
3.1	Introdução	21
3.2	Materiais	22
3.2.1	Aço de alta resistência	22
3.2.2	Resina	23
3.2.3	Betão	25
3.3	Descrição dos modelos de ensaio	29
3.3.1	Preparação das ancoragens	30
3.3.2	Injeção das ancoragens	31
3.4	Descrição dos ensaios	33
3.4.1	Ensaio monotónico	34
3.4.2	Ensaio cíclico	35
3.5	Instrumentação	36
3.5.1	Máquina de ensaio e aquisição de dados	36
3.5.2	Transdutores de deslocamento	37
3.6	Execução dos ensaios	39
4	Apresentação e análise dos resultados	41
4.1	Introdução	41
4.2	Apresentação dos resultados	42
4.2.1	Ensaio monotónico	42
4.2.2	Ensaio cíclico	44

4.3	CrITÉrios para análise dos resultados	45
4.4	Tratamento dos resultados dos ensaios monotÓnicos	45
4.4.1	Validação dos resultados	45
4.4.2	Intervalos de confiança e desvio absoluto à média	47
4.4.3	CrITÉrios de seleção das aproximações efetuadas	47
4.4.4	Aproximações ao comportamento	49
4.4.5	Tensão de aderência	50
4.4.6	Análise das medições efetuadas	51
4.5	Tratamento dos resultados dos ensaios cíclicos	52
4.5.1	Validação dos resultados	52
4.5.2	CrITÉrios de seleção das aproximações efetuadas para os ensaios cíclicos . .	54
4.5.3	Aproximações ao comportamento	55
4.5.4	Tensão de aderência	57
4.5.5	Análise das medições efetuadas	58
4.6	Análise comparativa dos resultados	59
4.6.1	Introdução	59
4.6.2	Comparação de forças e energia dissipada	60
4.6.3	Envolvente	61
4.6.4	Aproximações	62
4.6.5	Ensaio em controlo de deslocamento vs. controlo de força	62
5	Conclusões	65
5.1	Considerações gerais	65
5.2	Conclusões	66
5.3	Recomendações de trabalhos futuros	67

Referências Bibliográficas

69

Índice de Figuras

2.1	Diferentes tipos de ancoragem (Cook et al., 1998)	6
2.2	Componentes do sistema de injeção HILTI HIT-RE500 (T. Zenk, 2017) a) pistola de injeção, b) cartucho com resina e endurecedor, c) tubo injetor e misturador. . .	7
2.3	Comportamento do atrito e da resistência mecânica (Laldji, 1987)	8
2.4	Comportamento de pré-esforço (FIB, 2000)	9
2.5	Ilustração do efeito de Hoyer	10
2.6	Alteração da superfície de contacto de um cordão após perda de rigidez (Fernandes, 2011)	11
2.7	Resina destacada com betão	17
2.8	Pormenor da zona de interfaces da resina com o aço e com o betão	17
2.9	Tensões explosivas, fragmentares e de separação numa zona de ancoragem de pré-esforço (Model Code 2010, 2012)	19
2.10	Fendilhação na zona da interface resina-betão. Adaptado de Eligehausen et al. (2006b)	20
2.11	Modos de rotura de ancoragens adesivas pós-instaladas Cook et al. (1998)	20
3.1	Representação esquemática do reforço sísmico a uma ligação viga-pilar	21
3.2	Ilustração ensaio à flexão, ensaio à compressão e preparação do provete de ensaio	23
3.3	Gráficos dos ensaios à flexão (em cima) e à compressão (baixo) do provete de resina	24
3.4	Imagem de cubo após rotura à compresão (esq.) e cilindro após rotura no ensaio à tração por compressão diametral (dir.)	26

3.5	Dimensões e ancoragem do modelo de ensaio	30
3.6	Execução da furação (a); Aspeto do destacamento do cone de betão (b); Provetes após reparação (c)	31
3.7	Zona com fita-cola para impedir a adesão da resina ao cordão	32
3.8	Zona inferior da ancoragem, com o gesso, as cunhas e o tubo de injeção da resina (a); Zona superior da ancoragem onde se observam as cunhas e o excedente de resina (b)	32
3.9	Ilustração esquemática do comportamento de uma ancoragem aderente (Laldji, 1987)	35
3.10	Patamares de carregamento cíclico imposto	35
3.11	Sistema de ensaio	36
3.12	Esquema de montagem do acessório de transmissão de carga: montagem (a) e (b); aplicação de carga pela garra (c)	37
3.13	Acessório para suporte dos transdutores de deslocamento ao cordão e respetivos transdutores de deslocamento	38
3.14	Calibração de transdutor de deslocamento	38
4.1	Comportamento da ligação quando solicitada em regime monotónico	42
4.2	Deslocamento medido na garra da máquina e escorregamento medido na base, em função da força aplicada	43
4.3	Deslocamento medido na garra da máquina e escorregamento medido na base, em função da força aplicada	44
4.4	Ilustração genérica de uma função real com a nomenclatura das variáveis apresentadas	45
4.5	Intervalo de confiança de 99% para a força de adesão F_{ad} - (a) para todas as ancoragens; (b) para ancoragens aceites após exclusão dos <i>outliers</i>	46
4.6	Ilustração genérica da aproximação da função real monotónica e variáveis definidas	48
4.7	Representação das solicitações reais e as respetivas aproximações	49
4.8	Evolução da diferença entre o deslocamento medido na base e o deslocamento na extremidade solicitada em função do escorregamento medido na base.	51

4.9	Intervalo de confiança de 99% para a força F_{ad} - (a) para todas as ancoragens; (b) para ancoragens aceites após exclusão dos <i>outliers</i>	52
4.10	Energia dissipada em cada ancoragem em função do escorregamento medido na base em cada ciclo	53
4.11	Intervalo de confiança de 99% para a energia dissipada no primeiro ciclo de cada ensaio cíclico - (a) para todas as ancoragens; (b) para ancoragens aceites após exclusão dos <i>outliers</i>	54
4.12	Ilustração genérica da aproximação da função real cíclica e definição das variáveis a analisar	55
4.13	Representação das solicitações reais e as respetivas aproximações em regime cíclico	56
4.14	Energia dissipada em cada ancoragem em função do escorregamento medido na base em cada ciclo	58
4.15	Adaptação da curva envolvente aos ensaios monotónicos, com limites superior e inferior	61
4.16	Adaptação da curva envolvente aos ensaios cíclicos, com limites superior e inferior	62
4.17	Adaptação da curva envolvente à aproximações dos ensaios cíclicos e dos monotónicos, com limites superior e inferior da envolvente	62
4.18	Comparação da envolvente em controlo de deslocamento com o ensaio em controlo de força.	63

Índice de Tabelas

2.1	Tipos de sistemas de ancoragens adesivas e adesivos (Cook et al., 1998)	7
3.1	Características do aço de alta resistência	22
3.2	Resistência do betão à compressão antes da data de ensaio das ancoragens	26
3.3	Resistência do betão à compressão depois da data de ensaio das ancoragens . . .	26
3.4	Estimativa da resistência do betão à compressão aos 28 dias de idade	27
3.5	Cilindros - antes dos ensaios das ancoragens	28
3.6	Cilindros - depois dos ensaios das ancoragens	28
3.7	Caracterização do comportamento à tracção	29
3.8	Nomenclatura das ancoragens após injeção da resina	33
3.9	Data de ensaio das ancoragens	39
4.1	Valores de referência relativos aos ensaios das ancoragens ensaiadas em regime monotónico	50
4.2	Valores de referência relativos às aproximações obtidas para cada ancoragem nos ensaios em regime monotónico	50
4.3	Valores de referência das aproximações para cada ancoragem ensaiada em regime monotónico	51
4.4	Valores de referência para ancoragens ensaiadas em regime cíclico.	56
4.5	Valores de referência das aproximações para cada ancoragem ensaiada em regime cíclico	57

4.6	Valores da tensão de aderência admitindo um modelo uniforme para o comportamento das ancoragens em regime cíclico	57
4.7	Valores da energia dissipada por ciclo e por patamar; média e desvio absoluto à média (DAM) das três primeiras ancoragens	59
4.8	Energia dissipada entre os 0 e 5 milímetros nos ensaios monotônicos, a sua média e o desvio absoluto à média	60
4.9	Comparação das diferentes forças obtidas em cada ensaio	60
4.10	Resultados dos deslocamentos relativos às forças obtidas em cada ensaio, e respectivos erros relativos	60

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Alfabeto Latino

A_b	área de aderente, onde $A_b = \pi \cdot h_{ef} \cdot d_{em}$
A_{sp}	área transversal do cordão de pré-esforço, onde $A_{sp} = \frac{7}{36} \pi \phi_p^2$
d_{em}	diâmetro do elemento metálico
d	altura útil de uma secção transversal
d_f	diâmetro do furo
F_{ad}	força de adesão
F_1	força limite do ramo ascendente
$F_{max[0;5]}$	força máxima medida no ensaio entre 0mm e 5mm
F_{max}	força máxima total medida
$F_{\delta=5mm}$	força correspondente a um deslocamento do cordão de 5 milímetros medidos na base
h_{ef}	altura efetiva de embebimento
h	altura da secção de betão
l_{pt2}	valor de cálculo superior do comprimento de transmissão
l_{pt}	comprimento de transmissão na nomenclatura utilizada pelo Eurocódigo 2
l_{disp}	comprimento de regularização
l_{bpd}	comprimento de amarração
l_b	denominado como comprimento de ancoragem pelo Instituto Americano do Betão onde a correspondente nomenclatura utilizada em Portugal é o comprimento de amarração
l_{bp}	comprimento básico de ancoragem
l_{bpt}	comprimento de transmissão na nomenclatura utilizada pelo ModelCode2010
l_p	comprimento de regularização na nomenclatura utilizada pelo ModelCode2010
X_i	representa o valor individual de cada resultado para auxílio ao cálculo do desvio absoluto à média
\bar{X}	representa a média dos resultados individuais para auxílio ao cálculo do desvio absoluto à média

Alfabeto Grego

α_1	constante experimental consoante o tipo de solicitação na ligação aço/betão
α_2	constante experimental para aderência entre aço e betão consoante o tipo de cordão
α_8	constante experimental que depende do tipo de libertação da força
α_9	constante experimental que depende do tipo de verificação
α_{10}	constante experimental que depende do tipo de elementos ancorados
δ_1	valor do deslocamento do cordão medido na base em milímetros correspondente ao limite do ramo ascendente F_1
δ_{max}	valor do deslocamento do cordão medido na base em milímetros correspondente à força máxima
$\delta_{max[0;5]}$	valor do deslocamento do cordão medido na base em milímetros correspondente à força máxima entre os 0 e os 5 milímetros de deslocamento
λ_{Buc}	fator corretivo proposto por Buckner que toma valores $1,0 \leq 0,6 + 40 \varepsilon \leq 2,0$, onde ε corresponde à extensão nas armaduras para σ_{pd}
λ	rigidez característica do sistema de ancoragem adesiva mm^{-1}
π	valor da relação entre o diâmetro e perímetro de uma circunferência
σ_{bpd}	tensão de cálculo de aderência das armaduras de pré-esforço
σ_{bpt}	tensão de aderência das armaduras na transmissão do pré-esforço
σ_{pd}	valor de cálculo da tensão de ruptura à tração do aço das armaduras de pré-esforço
σ_{pi}	tensão nas armaduras na transmissão do pré-esforço após perdas instantaneas
σ_{pm0}	tensão na armadura imediatamente após a libertação
$\sigma_{pm\infty}$	pré-esforço após todas as perdas
$\sigma_{p\infty}$	tensão na armadura de pré-esforço a longo prazo
τ	tensão de aderência
ϕ_p	diâmetro nominal do cordão de pré-esforço

Abreviaturas

EC2	Eurocódigo 2
ACI	American Concrete Institute
CEB	Comite Euro-International du Beton
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
FIB	Fédération Internationale du Beton
FCT - UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
EN	Norma Europeia
DAM	Desvio absoluto à média

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os problemas estruturais são cada vez mais frequentes, e o reforço sísmico é uma realidade necessária. Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia, tem-se observado o aparecimento de novas soluções com novos materiais e diferente utilização, tanto na construção como no reforço de estruturas. As ancoragens aderentes tornam-se particularmente atraentes no reforço de estruturas pois não necessitam de um dispositivo de ancoragem mecânico, ocupando pouco espaço útil. As tensões envolvidas são distribuídas ao longo de um determinado comprimento não necessitando de armaduras adicionais de reforço na zona de ancoragem.

Esta dissertação insere-se no estudo de ancoragens pós-instaladas de cordões de aço de alta resistência por adesão com uma resina epoxídica, pretendendo-se analisar o seu comportamento face a ações monotónicas e cíclicas. O presente estudo está enquadrado no desenvolvimento de uma solução de reforço sísmico, no âmbito do trabalho de doutoramento da Engenheira Helisa Muhaj, no qual se pretende caracterizar o comportamento de uma ancoragem de um cordão de pré-esforço numa peça de betão. Pretende-se relacionar ainda a preparação da ancoragem e todos os defeitos encontrados com os resultados obtidos durante os ensaios.

1.2 Objetivos

O objetivo deste estudo prende-se com o facto de haver necessidade de melhor compreender o comportamento do conjunto betão-resina-cordão de pré-esforço, nomeadamente o comportamento da aderência em regime monotónico e cíclico. Este comportamento é absolutamente fulcral na conceção de uma ligação deste tipo, pois a transmissão das forças do cordão de aço de alta resistência para o betão determina a resistência da ligação, que por sua vez é fundamental para o desempenho no estado limite último da estrutura.

Pretende-se na presente dissertação estudar o comportamento da ligação betão-resina-cordão, e a sua capacidade resistente, contribuindo deste modo para o dimensionamento de soluções de reforço com pré-esforço com este tipo de ancoragens. A campanha experimental realizada foi organizada tendo em consideração os seguintes objetivos:

- Conhecer o comportamento da ancoragem quando solicitada;
- Calcular a resistência da ligação;
- Observar e estudar a degradação da ligação quando sujeita a ações cíclicas;

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos. No primeiro capítulo, enquadra-se a necessidade do presente estudo bem como os objetivos do mesmo e a estrutura do documento. No segundo capítulo, apresentam-se sumariamente os trabalhos de investigação efetuados por outros autores no mesmo âmbito: o estado do conhecimento ao nível das ligações aderentes, o fenómeno da aderência e o modo de análise deste tipo de ligações. No terceiro capítulo caracterizam-se os materiais utilizados, e apresenta-se a descrição dos ensaios programados, a instrumentação utilizada e o modo como foram executadas e ensaiadas as ancoragens. No quarto capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios e o tratamento estatístico efetuado tendo em vista a análise dos resultados segundo diferentes abordagens. No quinto e último capítulo, são apresentadas algumas conclusões do presente estudo, bem como as recomendações que se consideram necessárias.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Introdução

A aderência entre as armaduras e o betão é um fenómeno de extrema importância para as estruturas de betão armado. No caso de estudo o fenómeno da aderência toma um papel fundamental no desempenho da ligação e na transmissão das forças entre o cordão e o betão. Tirando partido deste fenómeno, introduz-se o conceito de ancoragem, mecanismo capaz de mobilizar e transferir forças de um elemento para outro, generalizado na ligação armadura-betão. Neste estudo pretende-se transferir as forças dos cordões de pré-esforço para o betão.

O estudo do comportamento da ligação de cordões de pré-esforço com outros materiais que não o betão ou caldas de cimento, começa a ganhar interesse devido à necessidade de encontrar novas soluções mais vantajosas. Tal é o caso da utilização de resinas epoxídicas para soluções em que os cordões são posteriormente selados em ancoragens pós-instaladas.

De modo a melhor compreender a importância e a caracterização da aderência, no presente capítulo são abordadas diversas matérias, conceitos e estudos efetuados pela comunidade científica, que se consideram mais relevantes. Alguns estudos são meramente enunciados, enquanto outros serão mais aprofundados consoante a necessidade e pertinência dos mesmos.

2.2 Trabalhos realizados por outros autores

O fenómeno da aderência de cordões de pré-esforço com caldas de cimento já foi amplamente estudado por vários autores conduzindo a inúmeras publicações. Menos conhecido e estudado é o comportamento deste tipo de ligações quando o agente que promove a aderência é uma resina. Neste campo existem alguns estudos dos quais se destacam Janney (1954), Cousins et al.

(1990b), Cousins et al. (1990a), Barnes et al. (2003), Cook et al. (1994), Cook and Konz (2001), Cook et al. (1998), Cook et al. (1996), Eligehausen et al. (2006a), Eligehausen et al. (2006b), Eligehausen et al. (1982), Laldji (1987) onde são tecidas várias hipóteses e comparações entre testes e resultados obtidos. Todavia, os estudos referidos destinam-se a aplicações diferentes da prevista no âmbito da presente dissertação. Os estudos citados são uma excelente base para que seja possível retirar *à priori* conclusões, de modo a corretamente dimensionar uma solução. O correto dimensionamento desta permite uma boa execução.

Cook, Eligehausen e Cousins estudaram com maior rigor os fenómenos e particularidades envolvidas no comportamento das ancoragens aderentes, tais como os comprimentos de referência, o tipo de tensões envolvidas e o seu caminho, o comportamento, a relação causa-efeito que a qualidade do betão, os materiais, a injeção, a geometria e o método de ensaio provocam nos resultados finais, e ainda apresentam sugestões de métodos de análise e recomendações de dimensionamento.

Podemos também encontrar no Bulletin n.10 da FIB (2000) e no Model Code 2010 (2012) um bom resumo, com comparação de resultados e conclusões de vários autores. Existem também recomendações do ACI Committee 318-08 (2008) para ancoragens por aderência.

Foram também consultados estudos mais recentes como as publicações de doutoramento de Faria (2011) e Louro (2014).

2.3 Pré-esforço

A introdução de pré-esforço nos elementos de betão, técnica inicialmente utilizada pelo francês Eugène Freyssinet em 1928, permitiu novas conceções estruturais. A aplicação desta técnica consiste em introduzir um estado de tensão no betão, que contrarie as ações de dimensionamento, de modo a que estas sejam anuladas parcial ou totalmente. Este método, divide-se em dois tipos principais de aplicação, a pré-tensão e a pós-tensão. Na pré-tensão o mecanismo de transmissão de esforços depende exclusivamente da aderência, funcionando como ancoragem todo o comprimento aderente, eliminando assim a necessidade de outros elementos para ancoragens de armaduras de pré-esforço. No caso da pós-tensão, existe necessidade de introduzir elementos de ancoragem, de interbloqueamento mecânico, nas extremidades da peça de betão que transmitem quase a totalidade dos esforços. Estes elementos provocam grandes cargas concentradas, trazendo alguns problemas para o betão como o esmagamento localizado. Ainda, no caso do pós-tensionamento, é possível injetar as bainhas com calda de cimento para obter um pré-esforço também aderente.

É particularizando o fenómeno da pré-tensão que podemos pensar em ancoragens adesivas pós-instaladas, ou seja, furos feitos *à posteriori* da betonagem da peça, onde são instalados cordões de alta resistência nos furos injetados com resina, que permitem a distribuição de tensões ao longo de um determinado comprimento, assegurando uma rápida execução e com menos condicionantes das que existem para o reforço de estruturas com soluções similares.

Relativamente a estas duas formas de aplicação de pré-esforço, cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens.

O pré-esforço é muito utilizado no reforço de estruturas dado o seu carácter ativo, ou seja, é capaz de suportar as cargas aplicadas após a execução do reforço, bem como cargas já instaladas na estrutura, o que se traduz numa vantagem para o comportamento em serviço (Faria et al., 2012).

Ancoragem

O conceito de ancoragem é fundamental na compreensão do efeito da transmissão de forças entre elementos. Como descrito em 2.1 este é responsável pela condução e transmissão de forças de um elemento para outro. O efeito de ancoragem pode ser amplamente explorado, sendo que no presente estudo o foco sejam as ancoragens adesivas pós-instaladas.

A ancoragem é um elemento de elevada importância, pois a sua performance condiciona o comportamento estrutural tanto a nível local como a nível global. Com vista a melhorar e prever melhor o seu comportamento, foram estudados novos modelos de ancoragens com diferentes particularidades. Estes estudos têm o intuito de adequar as ancoragens às várias necessidades existentes e futuras. No que diz respeito a estas ligações, inicialmente adotaram-se técnicas utilizadas noutros tipos de construção, como por exemplo ferrolhos deixados na cofragem para uso posterior, ou utilização de varões normais e barras com cabeça, designadas como ligações betonadas *in-situ*, rivalizando estas mais tarde com as ligações pós-instaladas (Faria, 2011). Neste documento abordam-se os vários tipos de ancoragem utilizadas na construção com o intuito de enquadrar a solução em estudo na presente dissertação, isto é, as ancoragens pós-instaladas posteriormente seladas com um agente de aderência.

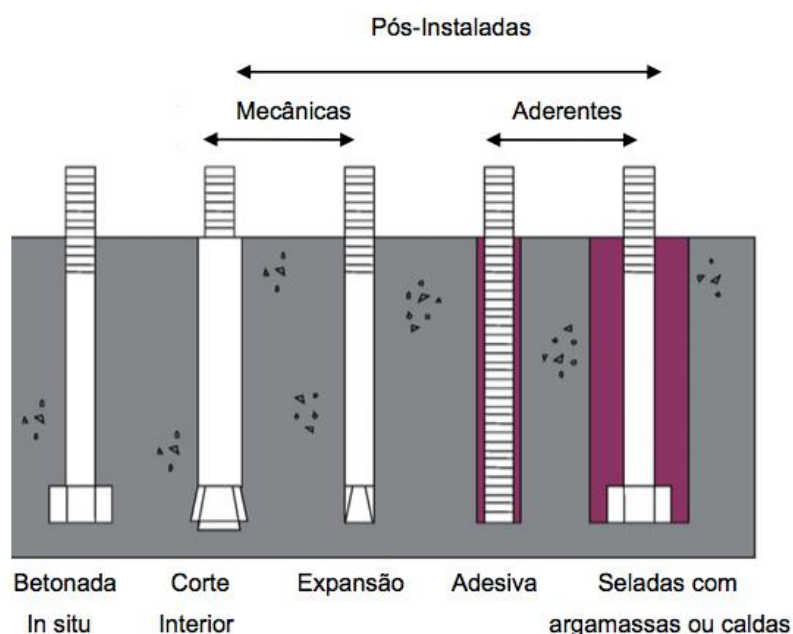


Figura 2.1: Diferentes tipos de ancoragem (Cook et al., 1998)

Note-se que a ancoragem em estudo é similar à ancoragem adesiva pós-instalada, com a diferença de se utilizar um cordão de pré-esforço em vez de um varão roscado.

Ancoragem pós-instalada

As ancoragens pós-instaladas são bastante atrativas no reforço de estruturas pela sua flexibilidade de execução, sendo também apreciadas cada vez mais tanto em projeto como em obra (Faria et al., 2012). Existe uma grande variedade de ancoragens pós-instaladas, conforme se observa na Figura 2.1, para diferentes funções e com diferentes características. No presente estudo são analisadas algumas características de uma ancoragem adesiva, pós-instalada, em que se utilizam cordões de aço de alta resistência.

Ancoragem adesiva

Como se pode observar na Figura 2.1, uma ancoragem adesiva é caracterizada pela inserção de um elemento metálico sem cabeça, num furo previamente executado na estrutura, onde o agente de aderência atua como elemento de ligação do elemento metálico ao betão. O agente de aderência a utilizar pode ser de diferentes tipos conforme se apresenta na Tabela 2.1. O agente utilizado no presente estudo é de origem orgânica epoxídica.

Tabela 2.1: Tipos de sistemas de ancoragens adesivas e adesivos (Cook et al., 1998)

Cápsula	Material de injeção	
Orgânica	Orgânico	Inorgânico
Epóxi	Epóxi	Cimentício
Poliéster	Poliéster	-
Viniléster	Viniléster	-

O sistema de injeção utilizado, que provou ter melhores características segundo Faria (2011), é o sistema HILTI HIT-RE500 (T. Zenk, 2017), e por isso foi o escolhido para o estudo em causa. Este sistema é constituído por uma pistola de injeção, um tubo injetor e misturador, um cartucho com dois componentes, uma resina e um endurecedor, como se observa na Figura 2.2.



Figura 2.2: Componentes do sistema de injeção HILTI HIT-RE500 (T. Zenk, 2017) a) pistola de injeção, b) cartucho com resina e endurecedor, c) tubo injetor e misturador.

2.4 Aderência

Este fenómeno está presente em todas as estruturas de betão armado na ligação aço-betão e nos elementos pré-esforçados, por pré ou pós tensão, injetados com calda de cimento, em ancoragens pós-instaladas, ancoragens adesivas, etc., transmitindo a força de pré-esforço para o elemento de betão (FIB, 2000). Como já referido anteriormente, e por outros autores (Faria, 2011; FIB, 2000; Louro, 2014) a importância desta ligação é absolutamente fulcral para a compatibilidade do comportamento dos vários materiais, e consequentemente para o desempenho estrutural da ligação.

Os mecanismos descritos por vários autores que contribuem para o efeito da aderência e para

a consequente transmissão de forças, podem ser agrupados em três principais categorias, como inicialmente descrito por Janney (1954), e corroboradas por outras publicações (Cook et al., 1998; FIB, 2000), sendo estas estruturadas por Faria (2011) da seguinte forma:

- Adesão
- Atrito
- Ação Mecânica

Cada um destes mecanismos apresenta a sua contribuição para o comportamento da aderência e podem ser facilmente observadas em gráficos de força/tensão-escorregamento, conforme simplificado por Laldji (1987) e adaptado na Figura 2.3.

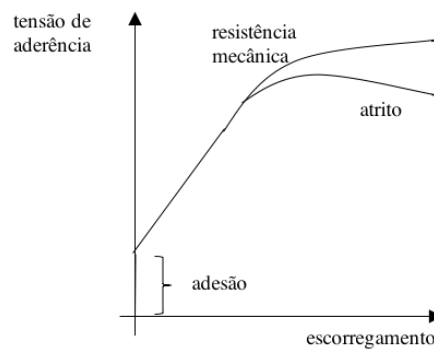


Figura 2.3: Comportamento do atrito e da resistência mecânica (Laldji, 1987)

2.4.1 Adesão

A adesão é a primeira componente da aderência a ser mobilizada. Esta é caracterizada por uma ligação química, o preenchimento por parte da resina das micro-saliências, como verificado por Fernandes (2011), e ainda por uma pequena componente de resistência mecânica correspondente à deformação do agente aderente. A adesão é caracterizada pela união do conjunto resina-aço, pois até se perder a adesão não existe movimento relativo entre os materiais. Este comportamento pode ser observado nos gráficos, tanto nos ensaios monotônicos como nos cíclicos, na zona onde se observa acréscimo de força ou tensão sem escorregamento (Laldji, 1987). Como se pode observar na Figura 2.4, a utilização de um fio ou de um cordão conduz a comportamentos diferentes. O aumento de resistência após a perda da adesão, deve-se provavelmente ao andamento helicoidal dos fios do cordão (FIB, 2000).

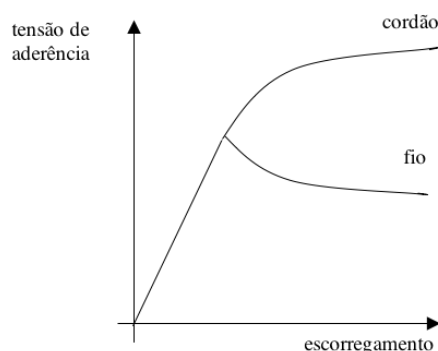


Figura 2.4: Comportamento de pré-esforço (FIB, 2000)

2.4.2 Atrito e acção mecânica

Após a dessolidarização dos materiais, mobiliza-se a segunda componente da resistência de uma ancoragem adesiva com cordões de pré-esforço. Esta componente é caracterizada e influenciada tanto pelos fenómenos do atrito como da resistência mecânica. O atrito e a resistência mecânica são provocados por alguns dos aspetos enumerados em seguida e que dizem respeito ao comportamento aço-betão e também podem ocorrer na ligação aço-resina.

- Efeito de Hoyer

O efeito de Hoyer, também conhecido como efeito de Poisson, é produzido neste caso pela variação de tensão no cordão de aço, originando uma consequente variação de secção. No caso em que o cordão perde tensão, o seu diâmetro tende a aumentar, mas como está impedido pelo betão produzem-se tensões radiais, aumentando o atrito. Este efeito é proporcional à alteração das tensões longitudinais no cordão, e pode ser benéfico caso o cordão não seja solicitado para um estado de tensão superior ao imposto quando foi executada a ancoragem. Caso aconteça, a consequência é uma diminuição da secção do cordão, originando uma perda de atrito. Caso o cordão esteja tensionado quando se executa a ancoragem, ao libertar o esforço, o cordão tende a aumentar a sua secção transversal, aumentando o atrito no agente de aderência. Podemos observar na Figura 2.5 uma ilustração exagerada deste efeito.

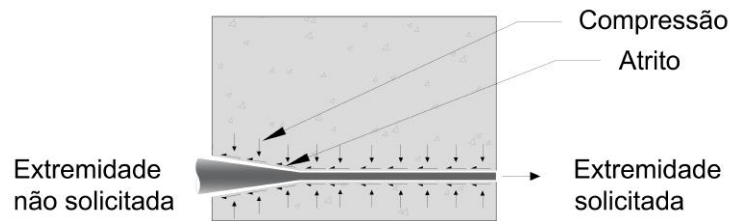


Figura 2.5: Ilustração do efeito de Hoyer

- Saliências microscópicas de resina bloqueadas nas falhas da superfície do cordão
 Geralmente, a área de contacto entre o aço e a resina, ou entre o aço e betão, é maior que a área nominal da superfície do cordão devido à rugosidade da superfície. Quando existe escorregamento, as micro-saliências são esmagadas, perdendo-se alguma resistência mecânica e conduzindo à mobilização do atrito (Fernandes, 2011; FIB, 2000; Laldji, 1987);
- Retração do betão
 No caso da injeção com caldas de cimento, a retração desta pode provocar fissuração e consequente perda de aderência. A retração do betão envolvente na ancoragem pode também diminuir o efeito do confinamento, diminuindo a pressão instalada e reduzindo a capacidade resistente da ancoragem.
- Forças de compressão externas ao betão
 As forças de compressão externas também têm influência na capacidade resistente da aderência, devido ao efeito de Poisson, pois o betão pode comprimir a zona aderente, ou aliviar a pressão na zona confinada.
- Traçado helicoidal característico dos cordões de pré-esforço
 O traçado helicoidal dos fios no cordão de pré-esforço contribui para o aumento do atrito tanto mais quanto maior for o impedimento da rotação do cordão, pois aumenta as tensões de compressão no contacto no meio envolvente.
- Nervuras criadas pela resina no espaço entre os fios do cordão
 As nervuras do cordão de aço de alta resistência contribuem para um aumento da resistência mecânica, pois em certas zonas a rotura é caracterizada como se observa na Figura 2.6, ou seja, é forçado um destacamento das nervuras, que exige mais esforço, após esse destacamento perde-se alguma rigidez do sistema;

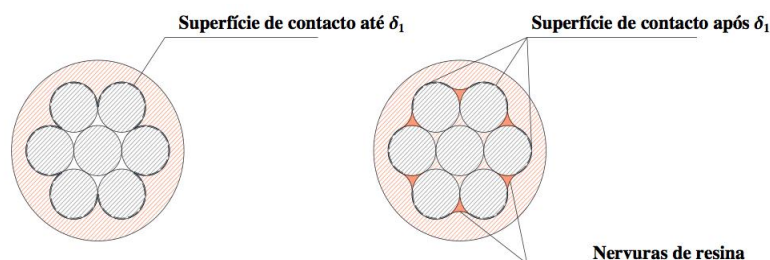


Figura 2.6: Alteração da superfície de contacto de um cordão após perda de rigidez (Fernandes, 2011)

Onde δ_1 representa o momento em que se perde a adesão e se mobiliza o atrito e a resistência mecânica.

2.4.3 Outros fatores que influenciam a aderência

Existem ainda um grande número de outros fatores que têm comprovada influência, mais ou menos significativa, no comportamento de uma ancoragem adesiva. De notar que alguns destes fatores dependem da interface entre o betão e o agente de aderência, devido às condições deste e devido ao comportamento da ligação deste com o agente, enquanto outros fatores estão diretamente relacionados com o agente de aderência. Os trabalhos de Cook and Konz (2001); Cook et al. (1996, 1998); Eligehausen et al. (2006b) abordam em pormenor as causas e os efeitos dos fatores que influenciam a adesão em ancoragens por aderência.

- Resistência do betão

A resistência do betão tem alguma influência no caso em que a rotura ocorre na interface agente de aderência-betão. Relativamente ao efeito que a resistência do betão provoca nas ancoragens aço-betão, de acordo com Cook and Konz (2001) a tensão resistente é inversamente proporcional à porosidade do agregado. Segundo Cook et al. (1998) a influência da resistência do betão não é significativa mas pode provocar uma melhoria no comportamento. Ainda é observado o efeito da variação da resistência conforme o tipo de agente aderente utilizado, ou seja, para os casos em que o agente de aderência não é betão deve-se ter especial atenção à interface agente/furo para garantir uma boa adesão (Eligehausen et al., 2006b).

- Sistema de furação e limpeza do furo

O sistema de furação pode também influenciar a aderência da ligação. No caso do furo ser efetuado com uma caroteadora, a ligação pode perder até 30% da capacidade aderente (Eligehausen et al., 2006b) devido ao facto de este equipamento criar uma superfície mais lisa. A adequada limpeza do furo considera-se essencial, isto é, a remoção de partículas e

pequenos destacamentos localizados resultantes do processo de furação através do uso de escovas próprias e sopradores manuais. Sem esta limpeza, observou-se uma diminuição de cerca 20% para sistemas de cápsulas, e de cerca 20% a 50% nos sistemas de injeção com ponta misturadora (Eligehausen et al., 2006b). Também Cook and Konz (2001) estudaram o efeito da alteração da aderência influenciada pela limpeza do furo, tendo chegado à conclusão que existe aproximadamente uma redução da resistência por aderência de 30% caso o furo seja inadequadamente limpo.

- **Humidade do furo**

Foram também estudadas as relações da aderência com a humidade do furo no momento da colocação do agente de aderência, sendo que nos furos húmidos bem como nos furos submersos observou-se uma redução das forças obtidas em condições secas. A ordem de grandeza das perdas é de 33% e 57%, respetivamente (Cook and Konz, 2001).

- **Temperatura**

A temperatura é um fator a ter em conta na escolha do agente de aderência, especialmente nos casos de em que se utiliza um adesivo epoxídico (Eligehausen et al., 2006b), a resistência pode ser bastante influenciada pelo aumento da temperatura, a partir dos quarenta graus centígrados.

- **Fendilhação do betão**

O estado de fendilhação do betão tem influência na sua capacidade de ancoragem. Mais à frente serão abordadas as causas e o tipo de fendilhação possível nas ancoragens por aderência. De notar que, para o caso de betão já fendilhado, as tensões de confinamento são menores o que pode provocar diminuição da aderência na interface betão-agente de aderência e comprometer a adesão (Eligehausen et al., 2006b).

- **Durabilidade**

Também foram estudados os efeitos de ancoragens desprotegidas do ambiente exterior, sujeitas aos ciclos naturais de gelo/degelo, variações de humidade e temperatura e substâncias agressivas, tendo algumas apresentado resultados em média 60% inferiores aos provetes protegidos. Os autores concluíram ainda que os mesmos efeitos em betão fendilhado tendem a piorar o comportamento da adesão, diminuindo a sua resistência (Eligehausen et al., 2006b).

2.5 Análise do comportamento

Para o correto dimensionamento de uma ancoragem por aderência, a análise do seu comportamento é fundamental. Para isso é necessário conhecer e compreender os métodos utilizados para o seu dimensionamento, e que tipos de falha e comportamento é expectável encontrar ou evitar na execução deste tipo de ancoragens. Nos subcapítulos seguintes, são

abordados alguns dos aspetos considerados na análise do comportamento de acordo com diferentes abordagens.

2.5.1 Comprimentos de referência

Os comprimentos de referência enunciados nos subcapítulos seguintes referem-se ao exposto na NP EN 1992-1-1 (2010), ACI Committee 318-08 (2008) e nas recomendações do Model Code 2010 (2012). No boletim número 10 da FIB (2000) é possível encontrar um resumo e respetiva comparação entre as principais abordagens ao nível do estudo de ancoragens.

Os comprimentos de referência são aqueles que permitem a transmissão da carga imposta do elemento ancorado à ancoragem. Consoante a abordagem, o comprimento total da ancoragem para que esta funcione corretamente, é dividido em comprimentos associados às fases do comportamento. As particularidades enunciadas são apresentadas mais detalhadamente em seguida.

Comprimentos de referência segundo o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010)

Na literatura portuguesa os comprimentos de referência são descritos como de transmissão, de regularização, e de amarração. O comprimento de transmissão l_{pt} , definido pela equação (2.1), consiste no comprimento do troço de armadura necessário para a transmissão das forças. O comprimento de regularização l_{disp} , definido pela equação (2.2), corresponde ao troço de ancoragem a partir do qual se considera uma distribuição de tensões uniforme. Por último, o comprimento de amarração l_{bpd} definido pela equação (2.3), é o comprimento para o qual se considera verificada a segurança. O cálculo destes comprimentos, bem como as constantes utilizadas referem-se à aderência betão-aço, sendo que para a aderência resina-aço ainda não estão previstas constantes.

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi_p \sigma_{pm0} / \sigma_{bpt} \quad (2.1)$$

$$l_{disp} = \sqrt{l_{pt}^2 + d^2} \quad (2.2)$$

$$l_{bpd} = l_{pt2} + \alpha_2 \phi_p (\sigma_{pd} + \sigma_{pm\infty}) / \sigma_{bpd} \quad (2.3)$$

De acordo com a secção 8.10.2 do Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010), as variáveis das expressões 2.1 representam além do descrito anteriormente:

$\alpha_{1,2}$ constantes experimentais consoante o tipo de solicitação e tipo de cordão, na ligação aço/betão

σ_{pm0} tensão na armadura imediatamente após a libertação

σ_{bpt} tensão de aderência das armaduras na transmissão do pré-esforço

d altura útil de uma secção transversal

Ainda, de acordo com a secção 8.10.2 do Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010), as variáveis das expressões 2.2 e 2.3 representam além do descrito anteriormente:

ϕ_p diâmetro nominal da armadura de pré-esforço

l_{pt2} valor de cálculo superior do comprimento de transmissão

σ_{pd} valor de cálculo da tensão de rotura à tração do aço das armaduras de pré-esforço

$\sigma_{pm\infty}$ tensão na armadura de pré-esforço após todas as perdas

σ_{bpd} a tensão de cálculo da aderência das armaduras de pré-esforço

Comprimentos de referência segundo o ACI Committee 318-08 (2008)

O ACI Committee 318-08 (2008) considera um comprimento de ancoragem, que inclui duas parcelas distintas de acordo com a equação (2.4). Das duas parcelas enunciadas, a primeira parcela diz respeito ao comprimento de transmissão l_{pt} , e a segunda parcela é referente ao comprimento de armadura necessário para resistir aos estados limites últimos (FIB, 2000). O fator λ_{Buc} acrescentado por Buckner depende da extensão do aço utilizado, tendo o objetivo de tornar esta equação mais conservativa.

$$l_b = \frac{\sigma_{pm\infty}}{21} \phi_p + \lambda_{Buc} \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pm\infty}}{7} \phi_p \quad (2.4)$$

Onde,

σ_{pi} tensão na armadura de pré-esforço após perdas

ϕ_p diâmetro nominal do cordão de pré-esforço

λ_{Buc} fator corretivo, que toma valores $1,0 \leq 0,6 + 40 \epsilon \leq 2,0$, onde ϵ corresponde à extensão nas armaduras para σ_{pd}

σ_{pd} valor de cálculo da tensão de rotura à tração do aço das armaduras de pré-esforço

Comprimentos de referência segundo as recomendações do ModelCode 2010 (2012)

À semelhança do Eurocódigo 2, o ModelCode 2010 (2012) define os comprimentos de referência mais detalhadamente que o ACI Committee 318-08 (2008). Os comprimentos estão definidos como comprimento básico de ancoragem l_{bp} definido pela equação (2.5) está definido como sendo o necessário para resistir aos esforços de dimensionamento para um elemento não pré-esforçado.

$$l_{bp} = \frac{A_{sp}}{\phi\pi} \frac{\sigma_{pd}}{\sigma_{bpd}} \quad (2.5)$$

Onde,

A_{sp} área transversal do cordão de pré-esforço $\frac{7}{36}\pi\phi_p^2$

$\phi\pi$ perímetro nominal do cordão

σ_{pd} valor de cálculo da tensão de rotura à tração do aço das armaduras de pré-esforço

σ_{bpd} a tensão de cálculo da aderência das armaduras de pré-esforço

O comprimento de transmissão l_{bpt} definido pela equação (2.6), é determinado como sendo uma porção do comprimento básico de amarração l_{bp} , homogeneizado pela relação entre as tensões instaladas no momento de transferência do pré-esforço σ_{pi} , e o valor de cálculo da tensão resistente das armaduras σ_{pd} bem como outros fatores.

$$l_{bpt} = \alpha_8 \alpha_9 \alpha_{10} \frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{pd}} l_{bp} \quad (2.6)$$

Onde,

$\alpha_{8,9,10}$ fatores que dependem do tipo de libertação da força, tipo de verificação, tipo de elementos ancorados

σ_{pi} tensão na armadura de pré-esforço após perdas

O comprimento de ancoragem de cálculo l_{bpd} definido na equação (2.7) é composto pelo comprimento de transmissão e uma parcela correspondente ao comprimento necessário para resistir aos estados limites últimos.

$$l_{bpd} = l_{bpt} + l_{bp} \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pm\infty}}{\sigma_{pd}} \quad (2.7)$$

Onde,

$\sigma_{pm\infty}$ tensão na armadura de pré-esforço após todas as perdas

h altura da secção de betão

Finalmente, o comprimento de regularização l_p definido pela equação (2.8) corresponde ao troço a partir do qual as tensões se difundem linearmente no betão, onde h representa a altura da secção de betão.

$$l_p = \sqrt{h^2 + (0,6l_{bpt})^2} > l_{bpt} \quad (2.8)$$

2.5.2 Tensões de aderência

Na análise de uma ancoragem por aderência, existem duas interfaces que são mobilizados e que transmitem força de um material/elemento para o outro. No caso em estudo, é possível admitir a hipótese de que a interface condicionante para o estudo em causa é a interface resina-aço. A mobilização da aderência na interface resina-aço é dependente da ligação química, do atrito e da resistência mecânica de deformação, como explicado anteriormente. Já no caso da interface resina-betão, tendo em conta a porosidade e rugosidade do betão, é possível mobilizar maiores forças, tornando assim a ligação aço-resina condicionante no sistema estudado. Esta hipótese é tomada como válida para o estudo em causa, razão de se descartar hipoteticamente os fenómenos inerentes à interface betão-resina. É hipoteticamente devido ao facto de os fios do cordão de pré-esforço serem lisos, e por isso menos capazes de mobilizar aderência quando comparados com o betão em contacto com a resina, que faz com que a aderência mobilizada na interface resina-aço seja menor que a mobilizada na interface resina-betão. Durante os ensaios, ao tentar separar alguma resina que ficou em excesso na zona exterior da ancoragem notou-se que a zona de resina que estava em contacto com o betão aderiu de tal maneira que destacou o betão, corroborando a hipótese de que esta interface betão-resina não seja condicionante no presente estudo. A título exemplificativo apresenta-se na Figura 2.7 a zona de contacto resina-betão em que se nota perfeitamente o agregado e restos do betão colados à resina.



Figura 2.7: Resina destacada com betão

Assim, admite-se que apenas se estuda o comportamento na interface resina-aço, simplificando o processo de análise, não tendo em conta a outra interface. De modo a que se perceba perfeitamente a abordagem, apresenta-se na seguinte figura um pormenor da zona da interfaces, Figura 2.8.

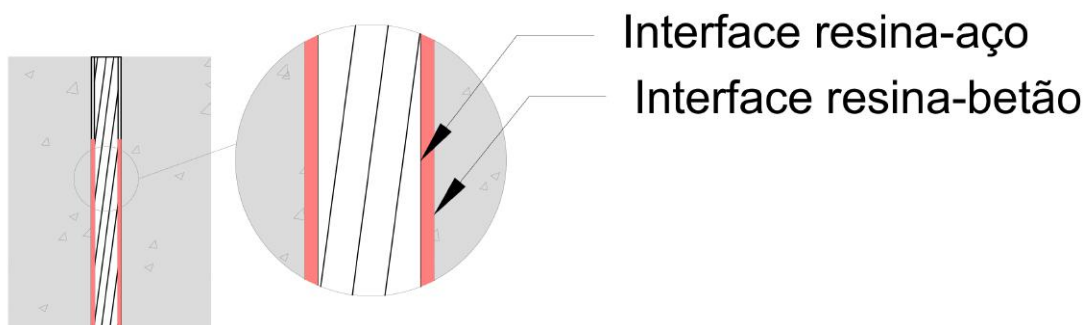


Figura 2.8: Pormenor da zona de interfaces da resina com o aço e com o betão

De acordo com a literatura de referência (Cook et al., 1998), a análise dos esforços envolvidos na solicitação de uma ancoragem pode ser feita de duas formas distintas, uma que simplifica a interação em causa com um modelo uniforme de tensões e outra que estuda com maior detalhe a interação aplicando um modelo elástico de tensões. Dependendo das variáveis apresentadas em baixo é possível admitir uma distribuição uniforme de tensões (eq. 2.9), caso se verifiquem as condições traduzidas pelas equações 2.10 a 2.12. Cook et al. (1998) apresenta estes parâmetros, corroborados por uma campanha experimental onde se observou as diferenças de comportamento relacionando-as com os resultados obtidos. Este estudo permite chegar à conclusão de que os resultados obtidos a partir do modelo uniforme quando comparado com o modelo elástico são semelhantes, começando estes resultados a divergir a partir do momento em que não são verificadas as condições apresentadas em baixo.

$$F = \tau \cdot \pi \cdot d_{em} \cdot h_{ef} \quad (2.9)$$

$$4.5 \leq h_{ef}/d_{em} \leq 25 \quad (2.10)$$

Onde, F representa a força instalada e τ a correspondente tensão de aderência. A parcela $\pi \cdot d_{em} \cdot h_{ef}$ representa a área onde se distribui a tensão uniformemente, onde h_{ef} representa a altura efetiva de embebimento da resina e d_{em} diâmetro do elemento metálico. As equações (2.11) e (2.12) são relativas à tensão média de rotura à compressão do betão f_{cm} e A_b é a área transversal do elemento metálico

$$13 \leq f_{cm} \leq 68[MPa] \quad (2.11)$$

$$1250 \leq A_b \leq 60000[mm^2] \quad (2.12)$$

Onde,

Caso estas condições das equações não sejam verificadas, as tensões envolvidas devem ser calculadas utilizando um modelo de distribuição de tensões elástico, não uniforme. No caso em estudo, a expressão de cálculo considerando uma distribuição não linear passa a ter a seguinte forma, em função da força última:

$$F = \tau \cdot \pi \cdot d_f \cdot \left[\frac{\tanh(\lambda \cdot h_{ef})}{\lambda} \right] \quad (2.13)$$

onde,

τ tensão de aderência

d_f diâmetro do furo

λ rigidez característica do sistema de ancoragem adesiva [mm^{-1}]

h_{ef} altura efetiva de embebedimento

A_b área de adesão, onde $A_b = \pi \cdot h_{ef} \cdot d_{em}$

d_{em} diâmetro do elemento metálico

De notar que o termo entre parênteses na equação (2.13) é substituído pelo termo de h_{ef} na equação (2.9). Para comprimentos relativamente curtos de embebedimento, o termo entre parênteses aproxima-se bastante da altura embebida real, enquanto que para valores cada vez maiores estes termos distanciam-se, mostrando que a força obtida numa ancoragem deste tipo não é diretamente proporcional ao comprimento embebido do elemento ancorado (Cook et al., 1998). Baseado em alguns estudos, Cook (1993) considera que o modelo não uniforme é mais apropriado para cargas baixas enquanto o modelo uniforme adapta-se melhor a cargas mais elevadas.

2.5.3 Tensões transversais na ancoragem

De acordo com o ModelCode 2010 (2012), existem três modos de potencial fendilhação das ancoragens de betão relacionadas com o tipo de tensões envolvidas, sendo estas denominadas como tensões explosivas, fragmentares e de separação. As tensões explosivas ocorrem devido à propagação das tensões de pré-esforço através da secção, as tensões fragmentares podem ocorrer na extremidade da ancoragem, especialmente no caso de almas muito finas, e as tensões de separação podem ocorrer ao longo do comprimento de transmissão como resultado do efeito de Hoyer quando o cordão é destensionado (Model Code 2010, 2012). Observam-se na Figura 2.9 as direções e a divisão de tensões mencionada.

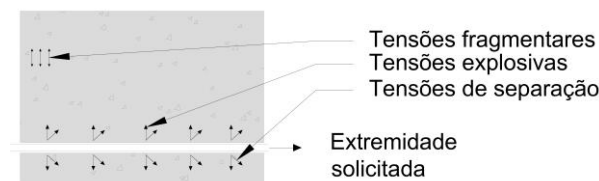


Figura 2.9: Tensões explosivas, fragmentares e de separação numa zona de ancoragem de pré-esforço (Model Code 2010, 2012)

Salienta-se ainda que o estado de fendilhação do betão também afeta a capacidade resistente das ancoragens, caso estas se situem em zonas onde o betão está traccionado. A capacidade resistente nestes casos pode ser considerada como 33% a 70% da capacidade resistente nominal das ancoragens, quando comparada com betão não fendilhado (Eligehausen and Balogh, 1995).

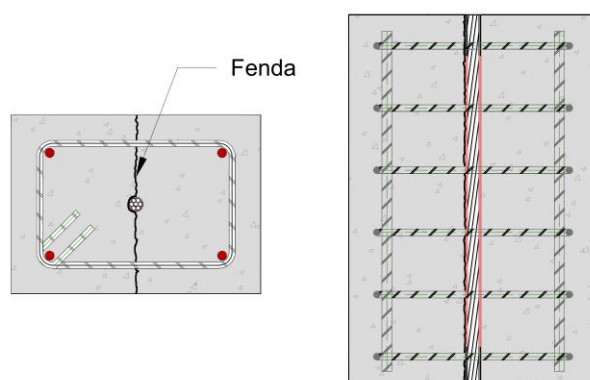


Figura 2.10: Fendilhação na zona da interface resina-betão. Adaptado de Eligehausen et al. (2006b)

2.5.4 Modos de rotura

De acordo com o trabalho desenvolvido por Cook et al. (1998) é possível identificar 5 modos de rotura conforme se apresenta na Figura 2.11. Estes modos dizem respeito a roturas nas superfícies de contacto entre materiais e ao nível dos próprios materiais. As roturas podem ser em forma de cone de betão (a), na interface adesivo-betão (b), aço-adesivo (c), combinação de aço-adesivo e adesivo-betão (d) e apenas no aço (e). Estes modos de rotura são normalmente originados devido a um muito pequeno comprimento aderente (a). Com um embebimento maior observa-se tipicamente um modo combinado, com um cone superficial, e com rotura por adesão numa das interfaces (b, c ou d). Caso o comprimento com agente de aderência seja longo o suficiente, pode observar-se a rotura no elemento de ancoragem. No Model Code 2010 (2012) é possível encontrar correspondência para estes modos de rotura, note-se apenas que o caso de rotura na interface agente-cordão é referido como *bondfailure* ou *pull-out*, ou seja, rotura por aderência ou por arrancamento. Estes modos estão relacionados diretamente com a resistência do betão, do agente aderente, comprimento aderente, tipo e direção do carregamento, distância das extremidades, confinamento e espaçamento entre ancoragens.

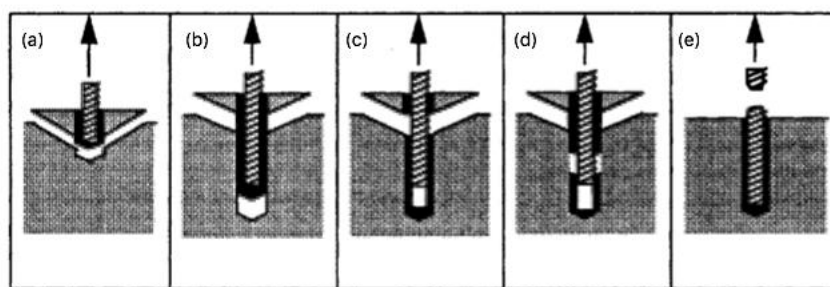


Figura 2.11: Modos de rotura de ancoragens adesivas pós-instaladas Cook et al. (1998)

Capítulo 3

Programa experimental

3.1 Introdução

No seguimento do estudo feito pela aluna de doutoramento Helisa Muhaj, considerou-se necessário avaliar o comportamento da ligação em causa. No âmbito do reforço de estruturas para sismos, a solução prevista consiste em ancorar dois cordões de pré-esforço, conforme ilustrado na Figura 3.1. Esta aplicação dos cordões pretende provocar uma melhoria do comportamento da ligação face à acção sísmica servindo também para conferir ao betão um estado de tensão que contrarie as ações a que estará sujeito.

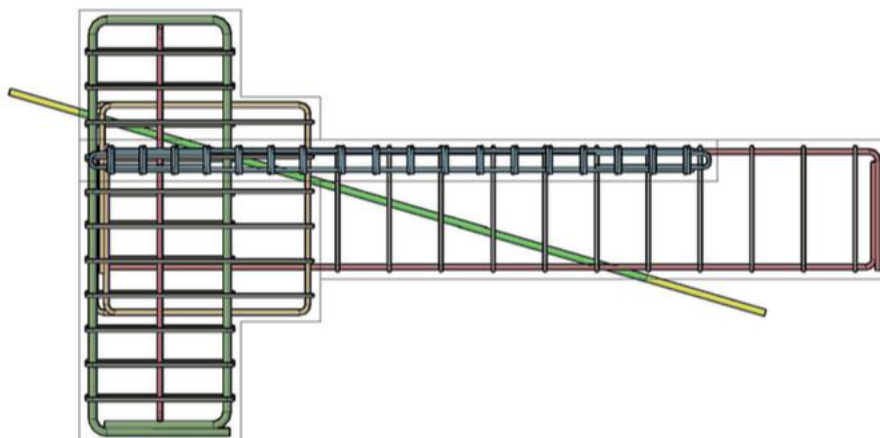


Figura 3.1: Representação esquemática do reforço sísmico a uma ligação viga-pilar

O presente estudo pretende contribuir para o aumento do conhecimento teórico e prático, sobre o modelo de ancoragem pós-instalada de um cordão de aço de alta resistência por adesão com resina epoxídica, particularmente recorrendo ao uso do sistema HILTI HIT-RE 500 (T. Zenk,

2017). Ainda, pretende-se solicitar os cordões ancorados com vários tipos de excitações para poder prever o seu comportamento em serviço. Por estas razões considera-se importante a caracterização do material, bem como a adequada instrumentação para obtenção de leituras significativas no estudo que se efetua.

Com base no descrito, optou-se por fazer dois tipos de ensaio: monotónicos e cíclicos. O primeiro para poder analisar e caracterizar o comportamento e comparar com modelos de outros estudos. O segundo com intuito de estudar a degradação da ligação quando solicitada ciclicamente, conforme o estudo previsto pela aluna Helisa Muhaj. O programa experimental da presente dissertação envolveu ainda ensaios de caracterização do betão e da resina. Relativamente à caracterização do aço não é necessário executar ensaios pois o aço foi entregue com certificado e a caracterização foi fornecida pela VSL, cumprindo com o exposto na norma EN 10204 (2004).

3.2 Materiais

Os materiais utilizados devem ser caracterizados de modo a que o estudo efetuado possa, primeiramente ser bem descrito, analisado e interpretado, além de garantir que as características prescritas correspondem às do material recebido, e em segundo lugar ser bem interpretado e analisado pelos leitores, possibilitando um uso mais amplo do estudo efetuado na presente dissertação.

3.2.1 Aço de alta resistência

De acordo com o certificado do aço disponibilizado pelo fornecedor garantindo a qualidade e características mecânicas do aço de alta resistência, obrigatório ao abrigo do decreto de Lei 28/2007 e da norma EN 10204 (2004), apresentam-se os resultados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características do aço de alta resistência

$\phi_{nominal}$ (mm)	A_p (mm ²)	$F_{p0.1}$ (MPa)	F_p (MPa)	E_p (GPa)
15,7	150	1640	1860	205

De notar que os cordões foram cortados em fábrica com comprimento de 1 metro, que é o necessário para que haja um comprimento livre suficiente para vencer a distância à garra que solicita o cordão (250mm), um outro comprimento livre (300mm) para poder haver escorregamento e colocar aparelhos de medição (dois transdutores de deslocamento) e ainda o comprimento da ancoragem, embebedimento e zona não aderente (450mm). Dois dos cordões entregues apresentavam maior percentagem de oxidação superficial, tendo as ancoragens destes cordões sido devidamente identificadas, e cada um deles ensaiado de maneira diferente, um cíclico e outro monotonicamente.

3.2.2 Resina

Para a caracterização da resina, e por se utilizar a mesma resina utilizada no estudo de Faria (2011), programou-se a realização de ensaios de flexão, segundo o método de ensaio RILEM CPT PCM-8, previsto em PCM (1995), de provetes de 40x40x160 mm, aproveitando posteriormente as metades resultantes do ensaios para realizar ensaios de avaliação da resistência à compressão. A resina testada é distribuída pela Hilti no sistema HILTI HIT-RE 500 (T. Zenk, 2017). No momento da programação do estudo em causa, assumiu-se que a resina teria as mesmas características da resina ensaiada por Faria (2011), pelo que se considerou que não seria necessário voltar a realizar ensaios. Esta decisão esteve também associada ao facto de se dispor de um volume de resina muito limitado. Após a conclusão dos ensaios, observou-se alguma discrepância relativamente aos valores obtidos por Faria (2011). No sentido de se compreender a proveniência dessa discrepância optou-se por utilizar a resina restante para comparar com os resultados obtidos no estudo desenvolvido por Faria (2011). Neste momento a resina disponível foi apenas suficiente para a preparação de um provete que foi ensaiado conforme se apresenta na Figura 3.2.

A referida figura ilustra a preparação do provete e o sistema de ensaio utilizado nos ensaios de flexão e compressão realizados.

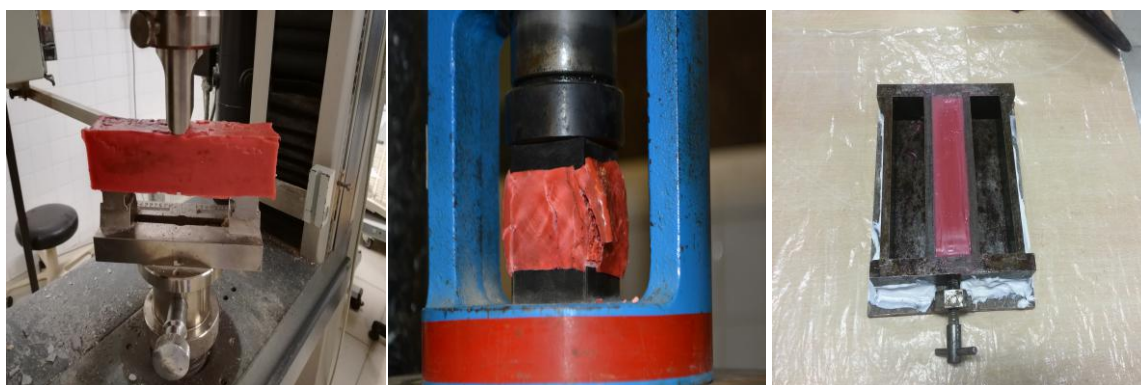


Figura 3.2: Ilustração ensaio à flexão, ensaio à compressão e preparação do provete de ensaio

Por forma à completa definição das características da resina, apresentam-se na Figura 3.3 os gráficos resultantes das medições efetuadas nos ensaios do provete de resina, para a sua caracterização, nomeadamente à flexão e à compressão. No caso dos ensaios de compressão, foram utilizadas as duas metades resultantes do ensaio de flexão. Os resultados são comparados com os obtidos por Faria (2011) que podem ser observados na sua publicação, no subcapítulo 4.5.2.4 nas Figuras 4.28 e 4.29.

Apesar da baixa relação entre o vão e a altura dos provetes, o efeito de corte foi desprezado no cálculo do módulo de elasticidade e no cálculo das tensões de tracção e extensões na fibra mais tracionada, tendo-se considerado que o material é isotrópico e admitindo-se a hipótese de Bernoulli. A tensão e a extensão são calculadas com base na Resistência dos Materiais da seguinte forma:

$$f_{pct} = \frac{2}{3} \frac{F \cdot L}{b \cdot h_p^2} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{pct} = 6 \cdot \frac{\delta_p \cdot h_p}{L^2} \quad (3.2)$$

onde, f_{pct} corresponde à tensão de tração por flexão, F representa a força registada na célula de carga, L o vão entre apoios, b a largura do provete e h_p a sua altura; ε_{pct} é a extensão de tração por flexão do provete e δ_p o deslocamento medido pelo sistema de ensaio.

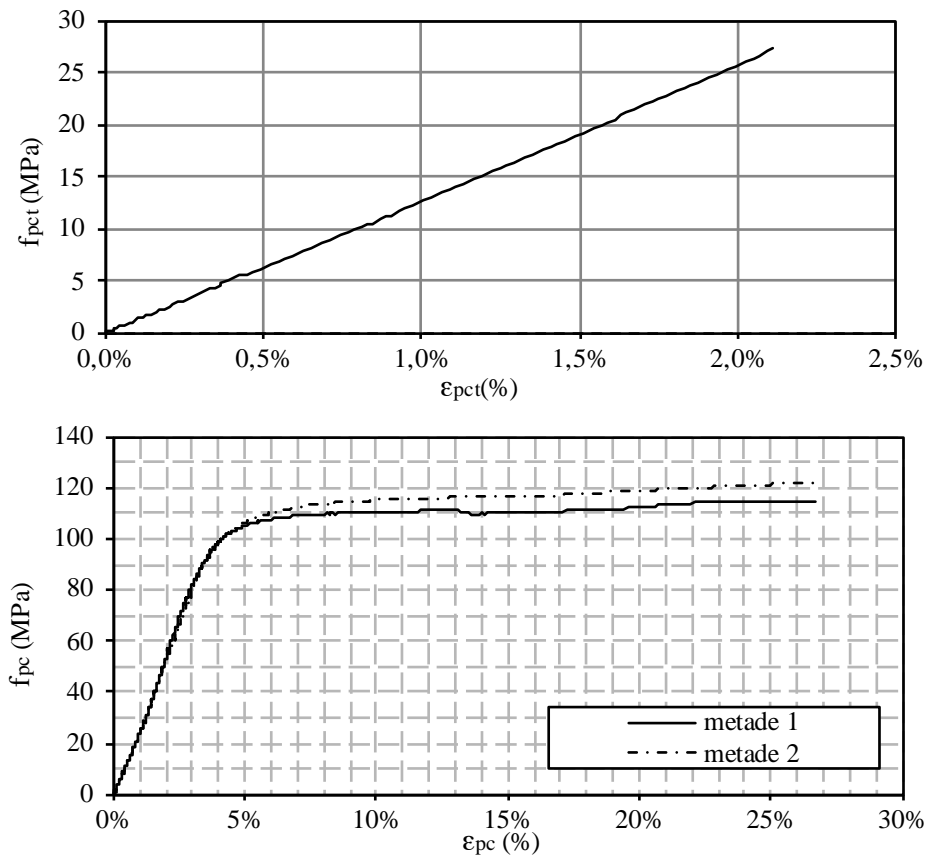


Figura 3.3: Gráficos dos ensaios à flexão (em cima) e à compressão (baixo) do provete de resina

Após estes ensaios e tendo-se constatado de que a resina ensaiada tem uma resistência inferior à testada por Faria (2011), procurou-se a razão desta diferença de resultados. A diferença observada no ensaio de flexão é de aproximadamente 14MPa para a mesma deformação de 2,1% e para o caso dos ensaio à compressão, verificou-se uma diferença de aproximadamente 17kN para uma deformação de 3%. Assim, avaliaram-se algumas possíveis razões desta discrepância, a saber:

- a presença de bolhas de ar no interior do provete, que pode ser atribuída a duas causas distintas: à produção de calor na reação da resina com o agente endurecedor ou à má injeção do provete;
- prazo e acondicionamento o primeiro, e menos provável, é o facto de o prazo de validade da resina estar no limite e esta poder perder algumas das suas características. O segundo é o possível mal acondicionamento da resina enquanto estava guardada;
- a não utilização êmbolo de injeção. Este último possível fator, deve-se ao facto de ser aconselhado o uso de um êmbolo para a injeção. Esta última observação só é possível, pois após contactar com a HILTI, esta referiu que para a mais correta aplicação da resina deveria ser utilizado um êmbolo de injeção.

Apesar de ser aconselhado pela HILTI o uso do êmbolo, era impossível utilizar este dispositivo na injeção das ancoragens, pois o espaço disponível para injeção é menor que o êmbolo. Constatou-se ainda que a aplicação da resina e o uso do sistema HILTI HIT-RE 500 (T. Zenk, 2017) não está homologado para o uso com cordões de pré-esforço. .

3.2.3 Betão

Neste estudo foi prevista a realização de ensaios ao betão no início e no fim de cada tipo de ensaios, e não aos 28 dias, pois é nesse momento que se considera importante ensaiar os provetes de betão para melhor caracterizar o comportamento real deste material durante os ensaios das ancoragens. Devido a circunstâncias especiais, não foi possível ensaiar os cubos e os cilindros entre os dois tipos de ensaios, sendo que se ensaiou os cubos e cilindros no início e no fim da totalidade dos ensaios. Após a realização dos ensaios calculou-se a tensão característica de do betão à compressão aos 28 dias, ou seja, da forma corrente de classificação do betão segundo o estipulado pelo EC2 (NP EN 1992-1-1, 2010).

Os ensaios programados são ensaios de avaliação da resistência do betão compressão em cubos, e ensaios para determinar a resistência à tracção do betão à tracção através de compressão diametral de cilindros. O dimensionamento dos provetes corresponde ao solicitado pela norma EN 12390-1 (2012). Os métodos de ensaio são os propostos pela norma NP EN 206-1 (2007) com a exceção da idade do betão. Na Figura 3.4 podemos observar a rotura de cada tipo de provetes.



Figura 3.4: Imagem de cubo após rotura à compressão (esq.) e cilindro após rotura no ensaio à tração por compressão diametral (dir.)

Cubos

Os cubos utilizados para caracterizar a resistência do betão à compressão possuem 150 milímetros de lado, de acordo com o disposto em EN 12390-1 (2012) e foram ensaiados, conforme anteriormente referido, não aos 28 dias mas antes e depois dos ensaios, aos 58 e 66 dias. Considerado mais importante para a caracterização do betão no momento de ensaio das ancoragens devido a caracterizar a realidade das condições de ensaio, apresentam-se os valores individuais de cada ensaio e o seu valor médio, antes (Tabela 3.2) e após os ensaios (Tabela 3.3).

Tabela 3.2: Resistência do betão à compressão antes da data de ensaio das ancoragens

F_{rotura} (kN)	f_c (MPa)	$f_{cm,58d}$ (MPa)
906	40,27	40,50
912	40,53	
916	40,71	

Tabela 3.3: Resistência do betão à compressão depois da data de ensaio das ancoragens

F_{rotura} (kN)	f_c (MPa)	$f_{cm,66d}$ (MPa)
950	42,22	41,07
960	42,67	
923	41,02	
875	38,89	
929	41,29	
926	41,16	
906	40,27	

De acordo com o previsto na secção 3.1.2 do EC2 (NP EN 1992-1-1, 2010), é possível calcular

a resistência à compressão média de um betão numa idade qualquer $f_{cm}(t)$ e conhecer qual o valor desta grandeza aos 28 dias f_{cm} , utilizando as equações (3.3) e (3.4).

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (3.3)$$

com

$$\beta_{cc}(t) = e^{s[1-(\frac{28}{t})^{1/2}]} \quad (3.4)$$

em que:

β_{cc} coeficiente que depende da idade do betão (t) e do tipo de cimento (s);

$f_{cm}(t)$ tensão média de rotura do betão à compressão à idade de t dias, obtido nos testes efetuados;

f_{cm} tensão média de rotura do betão à compressão aos 28 dias, conforme quadro 3.1 da norma NP EN 1992-1-1 (2010);

Na Tabela 3.4 apresenta-se o valor médio de tensão do betão durante os ensaios bem como o valor característico da tensão de rotura à compressão aos 28 dias.

Tabela 3.4: Estimativa da resistência do betão à compressão aos 28 dias de idade

t (dias)	$\beta_{cc}(t)$	$f_{cm}(t)$ (MPa)	$f_{cm(62)}$ (MPa)	$f_{cm,cubos(28)}$ (MPa)	$f_{ck,cubo}$ (MPa)	
58	1,08	40,50	40,79	37,53	29,53	C25/30
66	1,09	41,07		37,64	29,64	

Através dos ensaios dos cubos, obteve-se um valor de resistência à rotura por compressão do betão de 40,79 MPa, sendo que o valor característico deste betão aos 28 dias é 29,53 MPa, podendo ser designado como um C25/30.

Cilindros

Os ensaios de compressão diametral para caracterização da resistência à tracção foram executados, tal como no caso dos cubos, antes e após os ensaios das ancoragens. As dimensões dos cilindros correspondem ao exigido pela norma EN 12390-1 (2012), e foram executados, tal como no caso dos cubos, seguindo a norma NP EN 206-1 (2007), exceto no que diz respeito à idade do betão no momento dos ensaios. Estes resultados confirmam que o betão está suficientemente homogeneizado e que os resultados são coerentes. Os valores de cada ensaio de provetes cilíndricos, apresentam-se na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6 respetivamente antes e depois dos ensaios das ancoragens. Nos ensaios posteriores aos das ancoragens, um dos provetes cilíndricos teve uma rotura não conforme e por isso não foi utilizado para o cálculo do valor médio.

Tabela 3.5: Cilindros - antes dos ensaios das ancoragens

F_{rotura} (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ctm,sp,58}$
199	2,53	2,87
231	2,94	
246	3,13	
235	2,99	
217	2,76	

Tabela 3.6: Cilindros - depois dos ensaios das ancoragens

F_{rotura} (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ctm,sp,66}$
233	2,97	2,86
116	-	
216	2,75	
236	3,00	
212	2,70	

Segundo o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010), também é indicado o valor da resistência do betão à tração aos 28 dias recorrendo à expressão 3.5

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t)^\alpha f_{ctm} \quad (3.5)$$

considerando $\alpha = 2/3$ e o valor de β_{cc} de acordo com a norma NP EN 1992-1-1 (2010), onde:

f_{ctm} é o valor característico médio da resistência à tração simples à idade de 28 dias;

$f_{ctm}(t)$ é o valor característico médio da resistência à tração simples à idade de t dias, obtido nos ensaios realizados;

O valor da resistência à tração simples pode ser calculado através do valor da resistência à tração por compressão diametral conforme exposto na secção 3.1.2(8) do Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010).

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (3.6)$$

em que:

f_{ct} é o valor característico da resistência à tração simples;

$f_{ct,sp}$ é o valor característico da resistência à tração por compressão diametral;

Na Tabela 3.7, análoga à tabela 3.4, apresentam-se os resultados obtidos para a tensão, apresentado o valor médio da tensão de rotura à tração $f_{ctm(66)}$. Os resultados obtidos, em termos de caracterização do betão, são coerentes entre si, tendo sido possível obter a mesma classe de betão, a partir de provetes com diferente geometria (cubos e cilindros) e diferentes metodologias de ensaio.

Tabela 3.7: Caracterização do comportamento à tracção

t (dias)	$\beta_{cc}(t)$	$f_{ctm,sp}(t)$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)	$f_{ctm}(28)$ (MPa)	f_{ck} (MPa)
58	1,08	2,87	2,58	2,45	C25/30
66	1,09	2,86	2,57	2,43	

A partir dos resultados dos ensaios dos cilindros, obteve-se um valor médio de resistência à tração durante os ensaios de 2,58 MPa, enquanto aos 28 dias estima-se um valor de 2,44 MPa.

3.3 Descrição dos modelos de ensaio

Os modelos de ensaio foram dimensionados tendo em consideração os estudos efetuados por Faria (2011), Fernandes (2011) e Louro (2014), bem como tomando atenção aos estudos mencionados no presente trabalho.

Por outro lado, foi também indispensável a aproximação ao modelo que irá ser utilizado pela Doutoranda Helisa Muhaj. Neste sentido optou-se por uma ancoragem prismática que fosse capaz de atingir o nível de força necessário à implementação do sistema de reforço em estudo, nomeadamente 100kN em regime monotónico e cíclico, sem perdas significativas. Desta forma, foi necessário ter em consideração as seguintes condicionantes:

- tensão nos elementos constituintes não ser superior à tensão de cedência destes;
- obter forças de 100kN sem perdas e sem escorregamento significativo;
- dimensões compatíveis com o sistema de ensaio disponível;
- taxa de armadura transversal de 30% de modo a evitar fenómenos de *splitting*;

Para dar resposta às diversas condicionantes adotaram-se as dimensões dos provetes prismáticos utilizados nos ensaios da tese de doutoramento de Louro (2014), que garantem a primeira e terceira condições enunciadas anteriormente. para que fosse possível impôr forças da ordem dos 100 kN foi considerado um comprimento aderente de 350 mm, para não comprometer os restantes elementos, permitindo assim analisar apenas a interação resina-aço. Na sequência do

trabalho de Cook et al. (1998), nos provetes utilizados neste trabalho optou-se por deixar 50mm de cada extremidade livre para que a compressão devido ao efeito de Poisson não influencie o comportamento, conforme ilustrado na Figura 3.5.

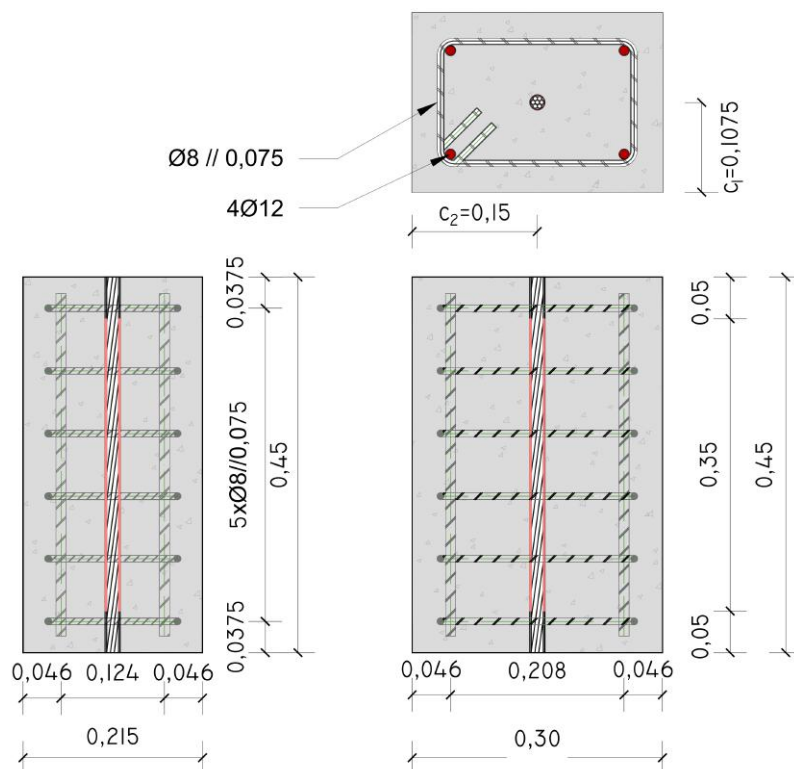


Figura 3.5: Dimensões e ancoragem do modelo de ensaio

Desta forma, os provetes a ensaiar possuem 215x300x450mm, sendo o comprimento de embebiamento do cordão de 350mm. Tanto estas medidas como as armaduras estão apresentadas na Figura 3.5. Como mostra a figura, as armaduras são constituídas por 4 varões de 12mm de diâmetro e 6 estribos de diâmetro 8mm, afastados de 75mm. Os cordões de alta resistência têm 15,7mm de diâmetro nominal e estão posicionados no centro de cada bloco. Os modelos foram dimensionados de modo a que a ruptura ocorresse na interface cordão-agente de aderência.

Ainda, tendo atenção ao explicitado em 2.5.2, foram respeitadas as condições que permitem o uso de um modelo uniforme de tensão aquando do cálculo da tensão de aderência Cook et al. (1998), obtendo o valor de 22,3 para o rácio entre a altura efetiva e o diâmetro do cordão, tendo um valor médio da tensão de rotura do betão de 40,8MPa, e a área de adesão é de 17263,05mm².

3.3.1 Preparação das ancoragens

Os furos para instalação das ancoragens foram executados com uma broca para perfurar betão, modelo TE-YX 18/92 e com um perfurador tipo martelo combinado SDS-max TE50, ambos da

HILTI. No momento de betonagem deixou-se um negativo para servir de furo guia com cerca de 12mm de diâmetro, para garantir que quando fosse executada a furação final, o furo estivesse retilíneo e não existisse influência do negativo no furo. O negativo tem diâmetro de 12mm e o furo final tem um diâmetro de 18mm. Durante a furação, na zona inferior de cada provete, destacou-se um cone de betão, tendo sido depois reparado com uma argamassa de reparação MonoTop-612 (2011) fornecida pela SIKA. Na Figura 3.6 é possível observar a execução do furo, a zona onde se destacou o cone de betão e a sua reparação para uma das ancoragens, sendo que se procedeu de igual modo para as restantes. O tubo plástico serviu para garantir que o furo continuava com as mesmas características, e posteriormente à aplicação da argamassa de reparação, colocou-se um pano húmido para garantir uma boa cura da argamassa.



Figura 3.6: Execução da furação (a); Aspeto do destacamento do cone de betão (b); Provetes após reparação (c)

Após a furação e a reparação dos provetes, procedeu-se à regularização da superfície com lixa apropriada. Posteriormente foi feito o transporte dos provetes para o LNEC onde se procedeu à restante preparação dos provetes, nomeadamente à injeção da resina, e ao ensaio dos mesmos.

3.3.2 Injeção das ancoragens

De modo a garantir o comprimento aderente de 350mm, as extremidades da zona aderente do cordão foram forradas com fita-cola, para impedir que a resina ficasse aderente para além dos 350mm, conforme se observa na Figura 3.7. Depois posicionou-se o cordão no furo com o auxílio de cunhas finas de madeira e selou-se a parte inferior com gesso, deixando um tubo por onde era possível injetar a resina conforme a Figura 3.8.

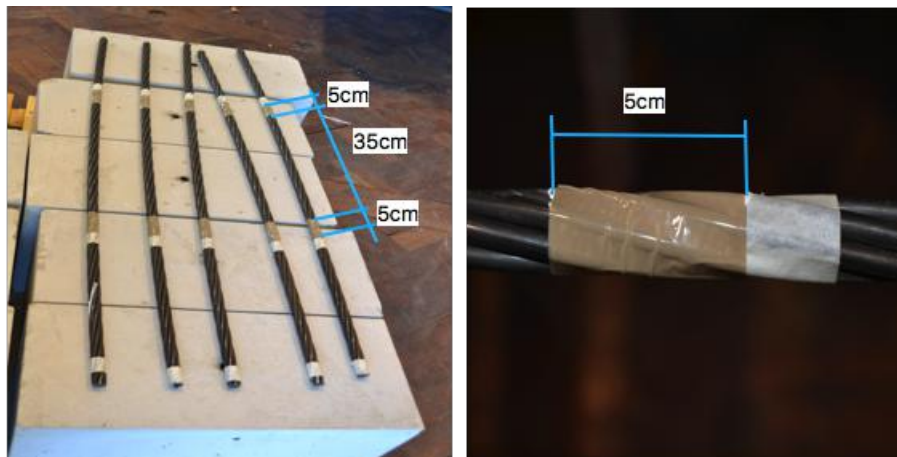


Figura 3.7: Zona com fita-cola para impedir a adesão da resina ao cordão

O processo de injeção ficava concluído sempre que se observava o excesso de resina a sair pelo tipo da ancoragem conforme a Figura 3.8, ficando o provete em cura. A injeção foi executada com um sistema de aplicador do tipo pistola manual, com ponta misturadora, conforme a Figura 2.2.



Figura 3.8: Zona inferior da ancoragem, com o gesso, as cunhas e o tubo de injeção da resina (a); Zona superior da ancoragem onde se observam as cunhas e o excedente de resina (b)

Após a injeção da resina procedeu-se à identificação de cada um dos provetes para que fosse possível fazer a distinção entre eles dado que não foi possível injetar todos os provetes em

simultâneo e exatamente nas mesmas condições. A nomenclatura utilizada para identificação dos provetes no momento da injeção da resina e a identificação de todas as ancoragens baseou-se nos seguintes critérios:

POM Ensaio em regime monotónico;

POC Ensaio em regime cíclico;

* Injeção deficiente, sem controlo de comprimento embebido;

F.L. Cordões oxidados e limpos (Ferrugem, Limpo);

A nomenclatura utilizada, consequente das observações, permite ter um sentido mais crítico e mais sensível na análise dos dados, sendo possível através desta identificação relacionar diferenças no comportamento entre ensaios. A identificação de todas as ancoragens pode ser observada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Nomenclatura das ancoragens após injeção da resina

Nome	Data	Defeito
POM_01	11-Jul	-
POM_02*	11-Jul	Problema de injeção
POM_03	11-Jul	-
POM_04	11-Jul	-
POM_05.FL	13-Jul	Oxidação de 1 fio
POC_01	12-Jul	-
POC_02	12-Jul	-
POC_03	12-Jul	-
POC_04	12-Jul	-
POC_05*.FL	13-Jul	Oxidação de 1 fio; Problema de injeção

3.4 Descrição dos ensaios

De acordo com o exposto em 3.1 foi prevista a realização de ensaios de arrancamento em regime monotónico e cíclico, com vista a criar um modelo que atinja as forças necessárias ao estudo da aluna de doutoramento Helisa Muhaj.

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, isto é, aplicando um deslocamento na extremidade solicitada e medindo ao mesmo tempo a força aí instalada. Assim, existe uma maior e melhor perceção do comportamento da ligação. Para a velocidade de ensaio consultou-se trabalhos de vários autores não tendo encontrado nenhuma resposta definitiva. Pelo facto de não haver conhecimento de ensaios em controlo de deslocamento para o estudo da

ligação betão-resina-cordão, optou-se por determinar uma velocidade que não excedesse a tensão máxima admissível por unidade de tempo quando se solicita à tracção cordões de aço de alta resistência (6-60MPa/seg), segundo a norma EN 15630-3 (2010). Transformando este incremento de tensão, em deslocamento no comprimento livre, obteve-se um valor de 0,3mm/seg. Note-se que, a partir do momento em que há escorregamento, o comprimento livre do cordão aumenta, consequentemente diminui a tensão e deformação instalada sendo então possível aumentar a velocidade de ensaio e observar o comportamento associado ao efeito da velocidade na mobilização do atrito.

Foram previstos 5 ensaios de cada tipo, de modo a ter uma amostra representativa, tendo ainda em conta que existe a possibilidade de haver danos irreparáveis em determinado provete ou a possibilidade de um existir algum ensaio que não seja conforme devido a erros de execução. Previu-se que, caso fosse possível ensaiar uma das ancoragens em controlo de força, seria importante para poder analisar e comparar as possíveis diferenças no comportamento, sendo então possível comparar os resultados em controlo de deslocamento do presente estudo com os ensaios em controlo de força efetuados no por Faria (2011).

3.4.1 Ensaios monotónicos

O ensaio monotónico de arrancamento puro ou *pull-out* visa caracterizar o comportamento do modelo de ensaio, nomeadamente da aderência da resina ao cordão de aço de alta resistência e também da mobilização do atrito e resistência mecânica entre os dois elementos. Este ensaio é caracterizado por um arrancamento gradual do cordão, com velocidade baixa até não se verificar aumento da tensão de aderência sem aumento de carga ou uma perda significativa da tensão aderente. O critério de paragem adotado para os ensaios baseou-se no valor da tensão de aderência, mais especificamente quando esta chegasse a aproximadamente de 75% da tensão de aderência máxima registada. O controlo foi feito manualmente através da observação do gráfico da solicitação imposta em tempo real.

Deste ensaio espera-se poder obter uma relação entre o escorregamento e a força aplicada, tendo como base um conjunto significativo de amostras, para que posteriormente seja possível dimensionar corretamente a ancoragem pretendida, simular várias análises e comparar os resultados obtidos com os de outros estudos à luz de várias teorias.

A Figura 3.9, é uma aproximação esquemática do comportamento da ligação em estudo. O troço inicial da curva corresponde à fase da adesão ($0 \leq \tau \leq \tau_{el}$). O segundo troço corresponde à mobilização do atrito e da resistência mecânica ($\tau_{el} \leq \tau \leq \tau_1$). A fase final do esquema apresentado ($\tau_1 \leq \tau \leq \tau_{max}$) corresponde à perda de rigidez do sistema, caracterizada pela alteração da superfície de contacto, como ilustrado na Figura 2.6.

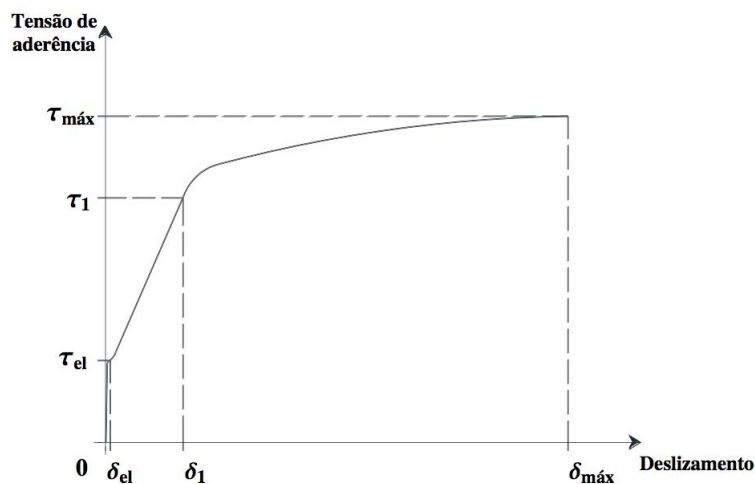


Figura 3.9: Ilustração esquemática do comportamento de uma ancoragem aderente (Laldji, 1987)

3.4.2 Ensaios cíclicos

Tal como já foi referido anteriormente, os ensaios cíclicos foram pensados de modo a replicar a solicitação a que a ancoragem será sujeita no estudo da aluna de doutoramento Helisa Muhaj prevendo o seu comportamento, para que seja possível dimensionar a ancoragem corretamente. Pretende-se estudar a degradação da ligação e a sua aproximação à envolvente monotónica podendo posteriormente, a partir dos ensaios monotónicos, prever o comportamento aquando de uma solicitação cíclica.

Estes ensaios foram pensados de modo a que haja um patamar mínimo de força aplicada de 85kN, sendo posteriormente solicitado ciclicamente, com incrementos de 15kN dos patamares de carga a cada 3 ciclos, conforme se exemplifica na Figura 3.10.

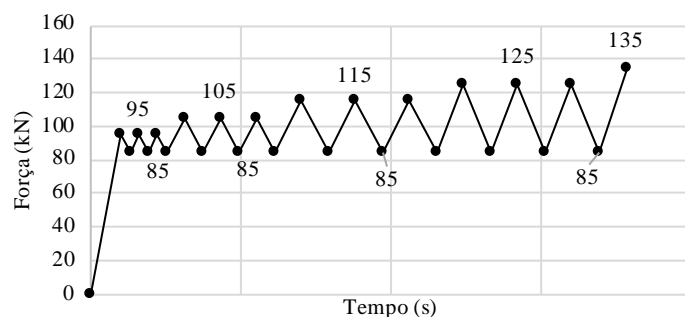


Figura 3.10: Patamares de carregamento cíclico imposto

3.5 Instrumentação

A adequada instrumentação de qualquer ensaio é fundamental para a obtenção de resultados fidedignos e adequados à finalidade pretendida. Nos pontos seguintes abordam-se os equipamentos de ensaio utilizados no presente estudo. De maneira a poder calcular uma relação direta entre o escorregamento e a força aplicada, é necessário medir tanto o deslocamento da extremidade livre do cordão bem como a força aplicada e o deslocamento da extremidade solicitada. Nesse sentido utilizou-se um sistema de ensaio similar ao utilizado por Louro (2014), que consiste no uso de uma máquina hidráulica servo-controlada, dois transdutores de deslocamento de 25mm solidarizados ao cordão através de um suporte em perspex, um acessório para transmissão da solicitação para o cordão e uma unidade de aquisição automática de dados.

3.5.1 Máquina de ensaio e aquisição de dados

A máquina utilizada para solicitação dos cordões, Schenck (LPM EQ 02), tem uma capacidade de aplicar carga até 1000kN em regime estático e 800kN em regime dinâmico. O curso do êmbolo é de $\pm 125\text{mm}$ com uma distância máxima entre garras de 1500mm segundo referido por Louro (2014). A classe de precisão do equipamento é de 0,5 de acordo com a norma ISO 7500-1 (2009). Na Figura 3.11 apresenta-se uma vista geral da máquina de ensaio usada bem como dos seus constituintes.

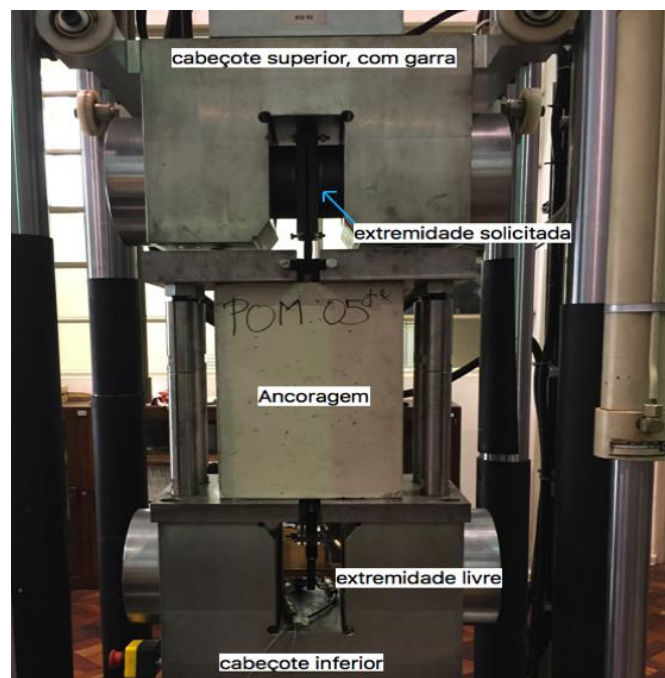


Figura 3.11: Sistema de ensaio

Para garantir a transmissão total da carga ao cordão de aço de alta resistência, foi utilizado um acessório para transmissão de cargas, que consiste em duas placas de aço de 3mm cada, aparafusadas, ficando o cordão entre estas. Ainda é colocada uma lixa e uma tira de cobre para garantir maior área de contacto para transmitir as forças ao cordão. Este acessório pode ser observado na Figura 3.12.

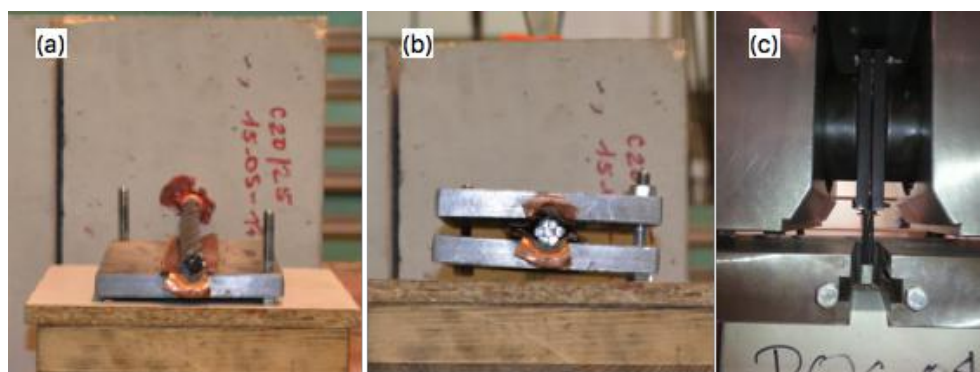


Figura 3.12: Esquema de montagem do acessório de transmissão de carga: montagem (a) e (b); aplicação de carga pela garra (c)

Para aquisição de dados utilizou-se um módulo multicanal de aquisição automática de dados (SPIDER 8), utilizando o software CATMAN, com capacidade de armazenar e apresentar os dados em tempo real. Os dados retirados do ensaio são provenientes da máquina, que fornece a força e o deslocamento da garra, e ainda os deslocamentos medidos na base da ancoragem pelos dois transdutores de deslocamento, dados estes que permitiram obter o escorregamento do cordão relativamente ao betão.

3.5.2 Transdutores de deslocamento

Para medir corretamente o escorregamento do cordão, é necessário que este seja medido na extremidade não solicitada. Com esse fim, utilizou-se um acessório que permitiu solidarizar o cordão e os transdutores de modo a que o deslocamento medido por estes fosse igual ao deslocamento do cordão em relação à resina. Foram utilizados dois transdutores com o intuito de obter uma leitura mais precisa e ponderada, minimizando eventuais erros inesperados de leituras ou leituras erradas.



Figura 3.13: Acessório para suporte dos transdutores de deslocamento ao cordão e respectivos transdutores de deslocamento

De modo a que as leituras sejam coerentes é preciso ter em atenção a calibração dos equipamentos. Nesse sentido, ambos os transdutores foram calibrados, e o cabo ligação para cada um dos transdutores até ao sistema de aquisição de dados foi sempre o mesmo.

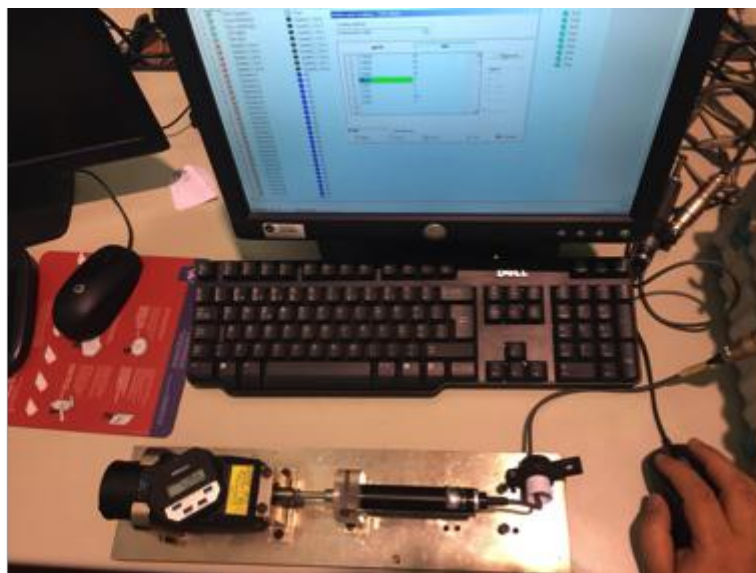


Figura 3.14: Calibração de transdutor de deslocamento

A calibração foi efetuada com recurso a um micrómetro, que permite estabelecer a relação

entre a leitura do transdutor e a curva de calibração. Obtida esta relação confirmaram-se os resultados em nove pontos, entre 0mm e 25mm. O aparelho está calibrado caso se confirmem que as leituras estão corretas. Caso contrário, é necessário repetir o processo.

3.6 Execução dos ensaios

Os primeiros ensaios realizados foram os ensaios de arrancamento monotónico, e de seguida os cíclicos. Esta ordem foi estabelecida para que, nos ensaios cíclicos, se pudesse aplicar uma força base coerente com os resultados obtido nos ensaios monotónicos. Optou-se também por ensaiar primeiro os provetes que tiveram problemas de injeção, pois visto ter acontecido tal problema, podemos considerar essas ancoragens como exploratórias para o teste que se efetuará, procedendo a alterações se necessário. Assim, cada um dos provetes foi ensaiado na data que se apresenta na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Data de ensaio das ancoragens

Designação do provete	Data
POM_02*	17-Jul
POM_01	17-Jul-2017
POM_04	17-Jul
POM_03	18-Jul-2017
POM_05.FL	18-Jul
POC_05*.FL	18-Jul-2017
POC_01	18-Jul
POC_02	19-Jul-2017
POC_04	19-Jul
POM_FC	19-Jul-2017

Durante a realização dos ensaios cíclicos, constatou-se que os resultados dos primeiros quatro ensaios eram muito similares entre si. Desta forma, optou-se por realizar o último ensaio em controlo de força, de modo a que fosse possível avaliar a diferença entre o comportamento de cada provete quando ensaiado em controlo de força ou em controlo de deslocamento. Neste caso, o provete denominado primeiramente como POC_03 passou a ter a designação de POM_FC.

Capítulo 4

Apresentação e análise dos resultados

4.1 Introdução

A apresentação dos resultados obtidos e a sua análise são fundamentais para o bom entendimento do leitor. A clareza na exposição dos resultados apresentados, no método seguido e nos critérios adotados são também fatores importantes a ter em conta para que as conclusões possam ser reproduzidas com exatidão.

No presente capítulo, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios monotónicos e cíclicos. Estes resultados são apresentados em escalas diferentes para que se possa observar melhor o comportamento em cada zona. Conforme o esquema apresentado na Figura 3.9, pretende-se observar com clareza a fase da adesão, a fase da mobilização do atrito e da resistência mecânica e por último a perda de aderência da ligação. Posteriormente à apresentação dos resultados obtidos, é efetuado o tratamento dos dados e a comparação dos resultados obtidos com os resultados expectáveis a partir da aplicação de outros modelos de análise do comportamento. Na fase de tratamento de dados, importa a significância de cada ensaio, sendo exploradas as condições de admissibilidade e a exclusão de resultados caso se verifique necessário. Considera-se também importante estudar a relação entre os resultados obtidos nos ensaios monotónicos e nos cíclicos através da adaptação de uma função envolvente dos resultados.

4.2 Apresentação dos resultados

4.2.1 Ensaios monotônicos

Apresenta-se na Figura 4.1 os deslocamentos em função da força registada nos ensaio monotônicos de todas as ancoragens. Os gráficos apresentam ordens de grandeza diferentes do escorregamento medido na base $[mm]$ e decrescentes, de modo a que se possa observar melhor os vários fenómenos.

Os gráficos apresentados na Figura 4.1 mostram o comportamento de todas as ancoragens. O gráfico superior (a) apresenta o escorregamento medido na sua totalidade, enquanto os gráficos (b) e (c) constituem ampliações do primeiro, de modo a tornar mais perceptíveis determinados fenómenos, nomeadamente a zona da perda de adesão entre os 0 e os 0,01 milímetros (b) e a zona de mobilização da resistência entre os 0 e os 3 milímetros (c).

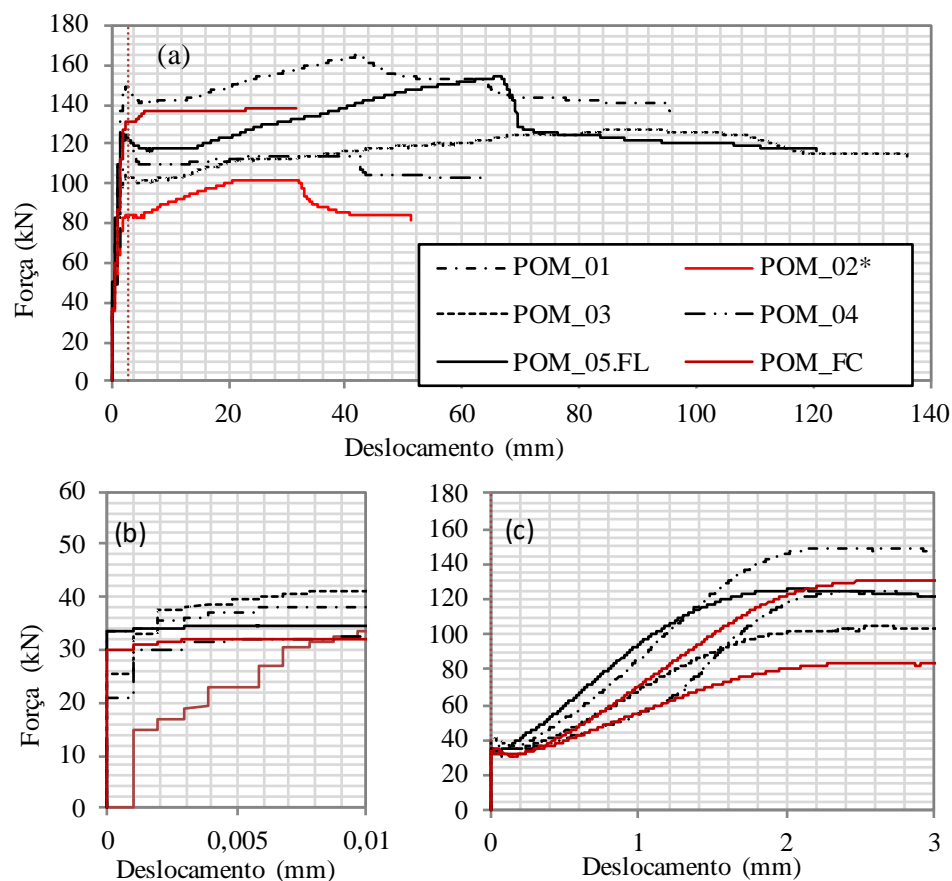


Figura 4.1: Comportamento da ligação quando solicitada em regime monotónico

É possível observar que o comportamento da ligação apesar de semelhante em forma da função, os valores de força resistente variam significativamente com uma dispersão que merece

uma análise cuidada, efetuada através da análise por intervalo de confiança e de por análise do desvio absoluto à média. Esta dispersão deve-se ao facto de as condições de aderência variarem bastante entre ancoragens. Ainda, é possível observar que após a fase de adesão, o conjunto do atrito mais a resistência mecânica das várias ancoragens apresenta um comportamento similar, ou seja, a relação força-escorregamento é semelhante.

O comportamento do provete POM_02* está representado a vermelho pois, como se verificará mais adiante o seu comportamento ignorado na análise global dos resultados obtidos será ignorada na análise global. Também a função que descreve o comportamento do provete POM_FC está representada a vermelho escuro, para a diferenciar das restantes, pois o ensaio foi efetuado em controlo de força, para que fosse possível comparar e relacionar os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por Faria (2011).

Além do escorregamento medido na base da ancoragem, na zona não solicitada do cordão, o próprio sistema de ensaio regista o deslocamento na extremidade móvel da máquina de ensaio que impõe o deslocamento à extremidade solicitada. Assim, apresenta-se a título de exemplo, o gráfico de uma solicitação com as duas medições de deslocamento, uma junto à base na zona não solicitada e outra no topo do cordão na extremidade solicitada (Figura 4.2).

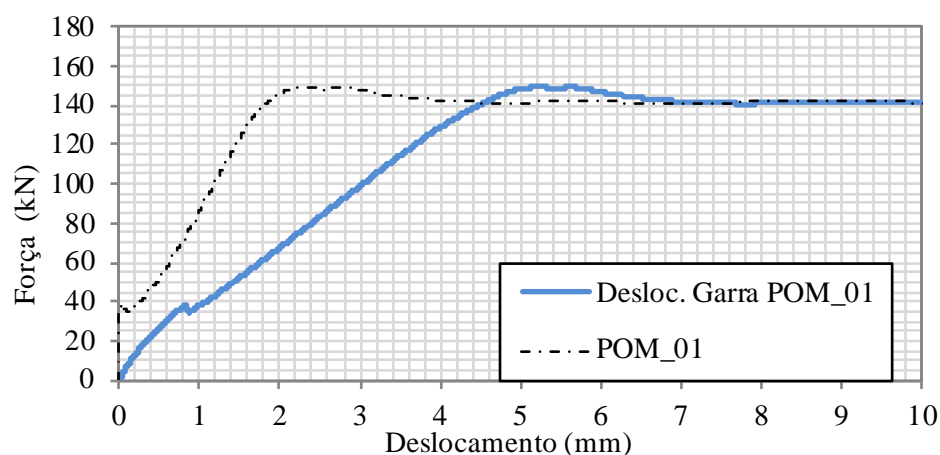


Figura 4.2: Deslocamento medido na garra da máquina e escorregamento medido na base, em função da força aplicada

4.2.2 Ensaios cíclicos

Analogamente aos resultados dos ensaios monotônicos, apresentam-se nesta secção os resultados dos ensaios cíclicos. Para maior facilidade na leitura dos gráficos, e tal como já efetuado na Figura 4.1 apresentam-se em ordens de grandeza do deslocamento medido diferentes, nomeadamente, a totalidade deste (a), a zona da perda de adesão (b) e a zona da mobilização do atrito (c).

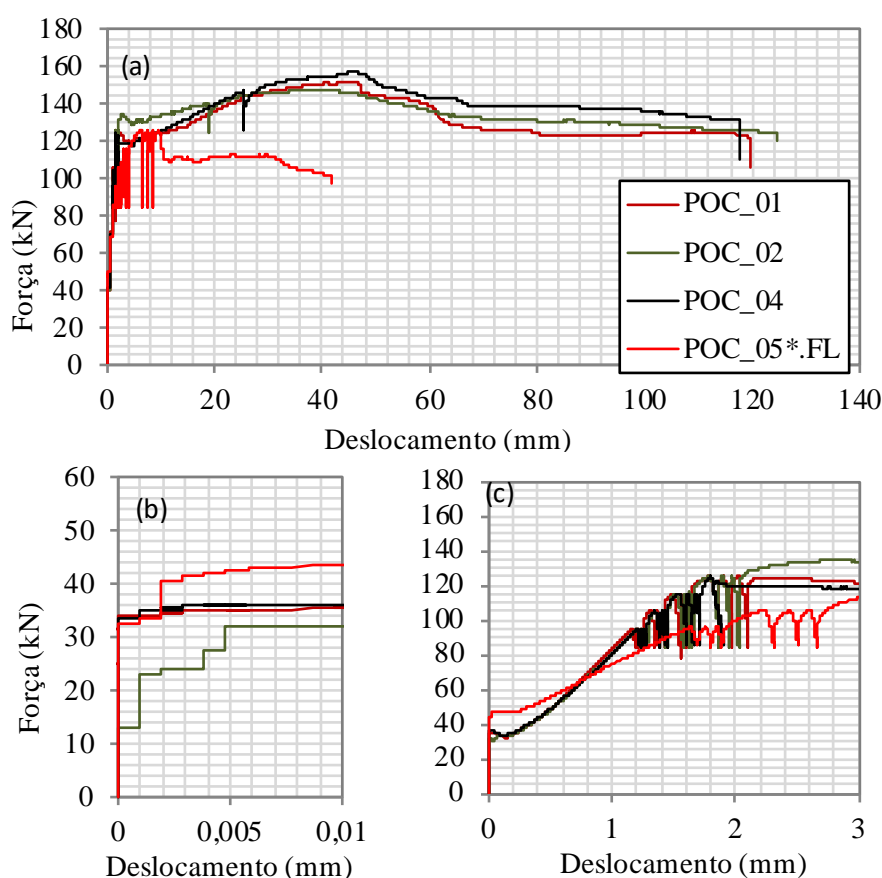


Figura 4.3: Deslocamento medido na garra da máquina e escorregamento medido na base, em função da força aplicada

De notar que os três provetes POC_01, POC_02 e POC_04 têm um comportamento muito similar e difícil de distinguir até atingirem os últimos ciclos, enquanto a ancoragem deficientemente injetada, a POC_05*.FL apresentou um comportamento diferente, com um escorregamento relativamente elevado durante os ciclos de carga impostos, quando comparado com o escorregamento obtidos nos restantes ensaios cíclicos.

4.3 Critérios para análise dos resultados

Por forma a ser mais intuitiva a compreensão da análise que se apresenta neste documento, é possível observar na Figura 4.4 o comportamento genérico de um ensaio e a nomenclatura utilizada para definir determinados pontos que se consideram importantes. Deste modo, estabelecem-se as bases para uma análise coerente durante todo o processo.

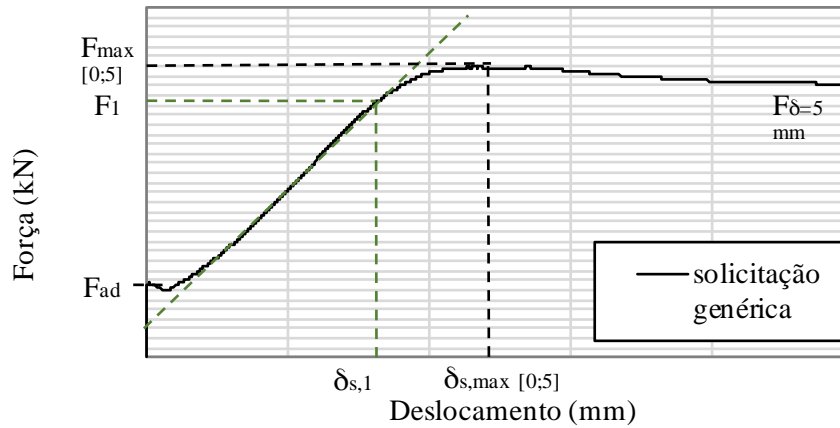


Figura 4.4: Ilustração genérica de uma função real com a nomenclatura das variáveis apresentadas

onde,

F_{ad} representa a força de adesão, após a qual passa a existir deslocamento relativo de todo o cordão em relação ao agente aderente;

F_1 representa a força limite do ramo ascendente, ou seja, a força a partir da qual o sistema de ancoragem perde rigidez, consequentemente existe um aumento maior da deformação do sistema para o mesmo incremento de carga, comparando com o comportamento verificado até este ponto;

$F_{max[0;5]}$ é a força máxima na solicitação com um escorregamento na base entre 0 e 5mm;

$F_{\delta=5mm}$ Força de solicitação quando o escorregamento na base é igual a 5mm.

4.4 Tratamento dos resultados dos ensaios monotónicos

4.4.1 Validação dos resultados

Antes da utilização dos dados dos ensaios para caracterizar o comportamento da ligação em estudo, Considerou-se necessário validar os resultados obtidos de modo a eliminar valores não

conformes que possam deturpar a análise. Relativamente à admissibilidade dos resultados, foi calculado o intervalo de confiança de 99%, como indicado por Burke (2001), considerando assim a análise mais robusta. A ancoragem ensaiada em controlo de força serve também para uma observação comparativa com os estudos efetuados por Faria (2011). Na Figura 4.5 apresenta-se o intervalo de confiança de 99% para a força de adesão (F_{ad}) e, no gráfico (a) estão incluídos os resultados de todos os ensaios e no (b) se apresentam os resultados validados após exclusão dos valores *outliers*¹. A Figura 4.5 refere-se à força de adesão.

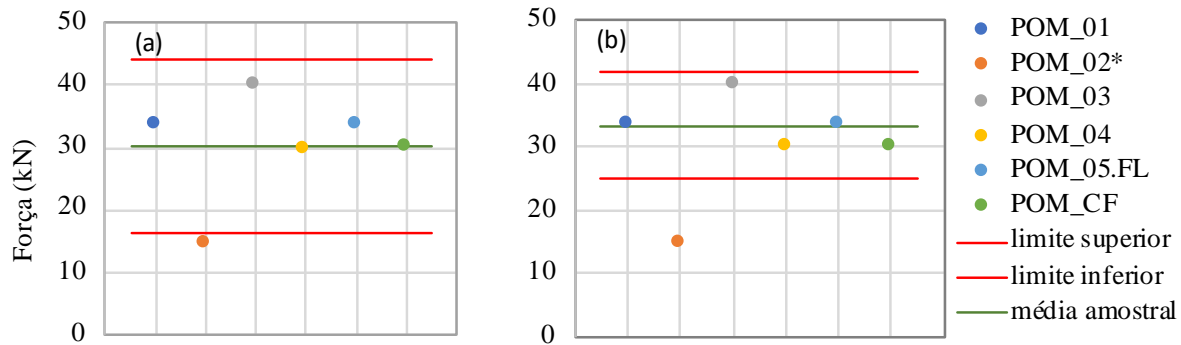


Figura 4.5: Intervalo de confiança de 99% para a força de adesão F_{ad} - (a) para todas as ancoragens; (b) para ancoragens aceites após exclusão dos *outliers*

A partir da Figura 4.5 (b) é possível afirmar que o valor médio da força de adesão é de 31,47kN, e os limites inferior e superior desta são de 27,47kN e 40,31kN, respetivamente. A Figura 4.5 (a) e (b) revela claramente que a ancoragem POM_02 é um *outlier* do intervalo de confiança. Esta observação é a confirmação de que a colocação da resina nesta ancoragem foi realmente mal executada não sendo representativa do sistema. Esta análise dá mais robustez às conclusões do estudo pois é a confirmação de que a ancoragem mal executada não é conforme com a restante família de ancoragens bem executadas.

Ainda relativamente à ancoragem POM_02*, na Figura 4.1 no canto inferior esquerdo (b), respeitante à fase da perda da adesão, podemos observar que esta apresenta um comportamento diferente das restantes, tal facto deve-se, muito provavelmente, aos problemas na injeção. Ainda, ter-se medido um deslocamento no primeiro momento de solicitação e, após os 15kN registar-se um escorregamento superior à média, são também indicadores de menor comprimento aderente. Esta observação vem confirmar que, como indicado na altura da injeção, a ancoragem foi injetada deficientemente, e que a zona aderente é muito provavelmente inferior aos 350mm, ou ao perímetro completo do cordão. Considera-se portanto, com esta justificação e com a análise da Figura 4.5 que a ancoragem POM_02* não é representativa da população e por isso excluída da análise. Podemos ainda constatar que ao excluir esta ancoragem, o valor médio da força de adesão aumenta e o intervalo de confiança torna-se mais pequeno e mais preciso, o que é um aspeto positivo.

¹ *outlier* é um dado não conforme com a família de resultados apresentados (Burke, 2001)

4.4.2 Intervalos de confiança e desvio absoluto à média

De modo a melhor entender a expressão dos resultados no universo das ancoragens similares às estudadas, decidiu-se que seria benéfico determinar o desvio absoluto à média (DAM) e o cálculo do intervalo de confiança.

Intervalos de confiança

Baseado nas publicações de Pereira e Requeijo (2008) Burke (2001), optou-se por calcular o intervalo de confiança de 99%, admitindo que os resultados seguem uma distribuição normal, calculada a partir da média. Este processo permite distinguir quais dos resultados devem ser considerados *outliers*. Assim, após verificados os *outliers* podemos descartar estes resultados. Como referido anteriormente, esta análise torna o estudo mais robusto e mais fiável, definindo assim um critério de exclusão de resultados puramente estatístico. Aliado a esta exclusão estatística é possível relacionar possíveis problemas na execução dos ensaios ou da preparação dos provetes de ensaio, permitindo fazer uma análise mais criteriosa e obtendo conclusões melhor fundamentadas do que apenas a sensibilidade e opinião do indivíduo que guia e/ou analisa os resultados experimentais.

DAM

O desvio absoluto à média é um parâmetro que nos indica qual o afastamento médio dos resultados individuais à média. Este expressa fundamentalmente qual a dispersão dos resultados na mesma unidade de medida destes. Este cálculo toma a seguinte forma:

$$DAM = \frac{|\sum X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \quad (4.1)$$

onde,

X_i representa o valor individual de cada resultado

\bar{X} representa a média dos resultados individuais

4.4.3 Critérios de seleção das aproximações efetuadas

Pretende-se aproximar, por meio de uma função, o comportamento real das ancoragens e dos valores característicos da força desenvolvida. De modo a obter valores coerentes da força de adesão e da força máxima durante o estudo, definiram-se critérios e parâmetros sobre os quais se

baseará a análise. A base desta aproximação é a igualdade da área de cada uma das funções, real e aproximada. A Figura 4.6 permite compreender estes parâmetros, a nomenclatura utilizada e o método de análise adotado.

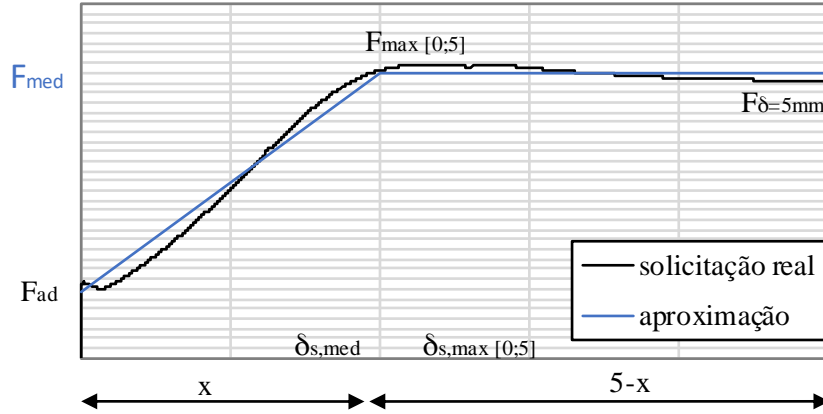


Figura 4.6: Ilustração genérica da aproximação da função real monotónica e variáveis definidas

Na Figura 4.6, as variáveis definidas representam:

F_1 Força registada imediatamente após o início de perda de rigidez do sistema, ou seja, a variação negativa da curva antes de atingir o valor máximo (observar Figura 4.4);

F_{med} Valor médio entre F_{max} e $F_{\delta=5mm}$;

F_{ad} Força correspondente ao valor elástico obtido através da solicitação real;

x calcular o valor de x fazendo igualar as áreas das funções, real e aproximada.

Para a correta definição do método de análise utilizado, é necessário o cálculo das áreas que segue o raciocínio apresentado em seguida, sendo assim possível calcular o valor de x , e definir uma função de comportamento:

A_{real} cálculo da área da função real através da regra dos trapézios simplificada.

$$A_{aprox} = \frac{(F_{ad} + F_{med})}{2} \times x + F_{med} \times (5 - x)$$

Na Tabela 4.1 podem observar-se os valores obtidos para cada uma das fases enunciadas na Figura 3.7, que traduz simplificadamente os troços de referência para a função do comportamento. Como explicado no capítulo 3.4.1, o troço inicial da curva corresponde à fase da adesão. O segundo troço representa a mobilização do atrito e da resistência mecânica. A fase final do esquema apresentado corresponde à perda de rigidez do sistema, caracterizada pela alteração da superfície de contacto, registando-se o valor representado como F_1 na Figura 4.6.

4.4.4 Aproximações ao comportamento

Por forma a melhor prever o comportamento de uma ancoragem, e de melhor analisar cada uma destas, pretende-se aproximar por meio de uma função por ramos a resposta à solicitação real. Deste modo procedeu-se como detalhado acima, obtendo as funções de comportamento denominadas como PN_0X, onde X representa o mesmo algarismo de identificação do provete sobre a qual se baseia a aproximação.

Na Figura 4.7 apresentam-se todas as aproximações de todas as ancoragens admitidas como representativas do estudo em causa. Estas aproximações foram obtidas segundo o método acima descrito, onde foram excluídas as ancoragens com resultados não satisfatórios, com razões plausíveis e fundamentadas de exclusão, isto é, os *outliers* do intervalo de confiança, em particular a ancoragem POC_02*.

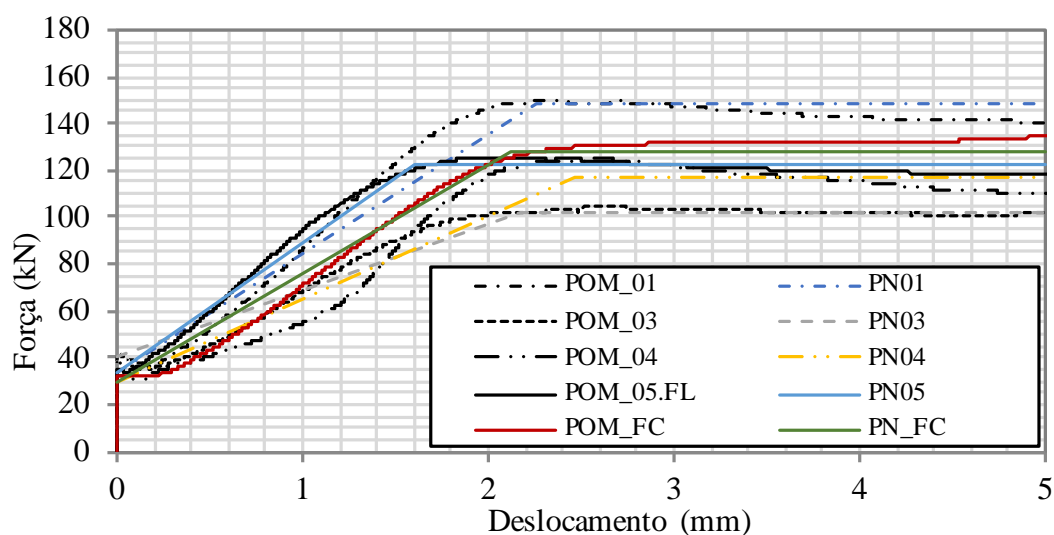


Figura 4.7: Representação das solicitações reais e as respectivas aproximações

Os resultados obtidos, para os valores característicos da força elástica, ou de adesão, da força média e da força máxima no intervalo analisado são apresentados na seguinte tabela.

A energia dissipada pela função de aproximação é igual à energia libertada durante o ensaio na solicitação real. É possível, com os valores apresentados na Tabela 4.1 calcular o afastamento absoluto à média (DAM) (Burke, 2001) de cada grandeza que se apresenta na Tabela 4.1. Respetivamente, da esquerda para a direita, estes valores apresentam um desvio absoluto à média de 1,70kN, 9,67kN, 0,18mm, 11,64kN, 0,87mm e 14,52kN, conforme exposto na Tabela 4.1.

Na Tabela 4.2 apresentam-se todas as forças obtidas em cada uma das aproximações, através do método apresentado no ponto 4.4.3.

Tabela 4.1: Valores de referência relativos aos ensaios das ancoragens ensaiadas em regime monotónico

Nome	F_{ad}	F_1	$\delta_{s,1}$	$F_{max[0;5mm]}$	$\delta_{max[0;5mm]}$	$F_{\delta=5mm}$
POM_01	33,60	127,80	1,57	149,32	2,31	146,28
POM_03	40,00	90,24	1,51	102,32	2,22	101,60
POM_04	30,00	107,30	1,79	125,04	2,56	110,16
POM_05.FL	33,60	103,10	1,15	125,40	2,00	118,44
POM_FC	30,16	112,90	1,75	134,34	5,00	134,34
Média	31,47	108,27	1,55	127,28	2,82	122,16
DAM	1,70	9,67	0,18	11,64	0,87	14,52

Tabela 4.2: Valores de referência relativos às aproximações obtidas para cada ancoragem nos ensaios em regime monotónico

Nome	F_{ad} (kN)	F_{med} (kN)	δ_{med} (mm)
PN_01	33,60	147,80	2,25
PN_03	40,00	101,96	1,87
PN_04	30,00	117,60	2,46
PN_05.FL	33,60	121,92	1,60
PN_FC	30,16	128,39	2,13
Média	31,47	123,53	2,06
DAM	1,70	11,65	0,26

4.4.5 Tensão de aderência

A tensão de aderência pode ser calculada de duas formas distintas como apresentado na secção 2.5. Pode ser assumida uma distribuição uniforme de tensões ao longo do comprimento aderente, ou uma distribuição não uniforme baseada num modelo de comportamento elástico. O objeto do presente estudo apresenta uma geometria que, apesar do modelo de cálculo de tensões se encontra já no limite do que é aceitável para se efetuar o cálculo segundo um modelo uniforme, este ainda pode ser utilizado segundo Cook et al. (1998). Assim, transformando e aplicando a equação (2.9) de modo a que se obtenha o valor da tensão de aderência, obtém-se a seguinte expressão.

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d_{em} \cdot h_{ef}} \quad (4.2)$$

O termo $\frac{1}{\pi \cdot d_{em} \cdot h_{ef}}$ é um valor constante de proporcionalidade, de grandeza $0,01726305m^2$. Substituindo esta constante na equação (4.1) obtém-se:

$$\tau = \frac{F[kN]}{0,01726305} \cdot 10^{-3} \quad (4.3)$$

Aplicando a equação (4.2), é possível calcular o valor da tensão de aderência em *MPa* correspondente a cada valor de força medido (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Valores de referência das aproximações para cada ancoragem ensaiada em regime monotónico

Nome	$\tau_{ad}(MPa)$	$\tau_1(MPa)$	$\tau_{med}(MPa)$	$\tau_{max[0;5mm]}(MPa)$	$\tau_{\delta=5mm}(MPa)$
POM_01	1,95	7,40	8,56	8,65	8,47
POM_03	1,74	5,23	5,91	5,93	5,89
POM_04	1,74	6,22	6,81	7,24	6,38
POM_05.FL	1,95	5,97	7,06	7,26	6,86
POC_CF	1,75	6,54	7,44	7,78	7,78
Média	1,82	6,27	7,16	7,37	7,08
DAM	0,10	0,56	0,67	0,67	0,84

4.4.6 Análise das medições efetuadas

No presente subcapítulo, pretende-se expor e analisar a diferença entre as medições efetuadas, quer do escorregamento na base, quer do deslocamento na zona da solicitação. Analisando a diferença entre estas medições, é possível calcular, aproximadamente, a deformação no cordão de pré-esforço. Na Figura 4.8 apresenta-se a relação entre a diferença anteriormente referida e o escorregamento na base.

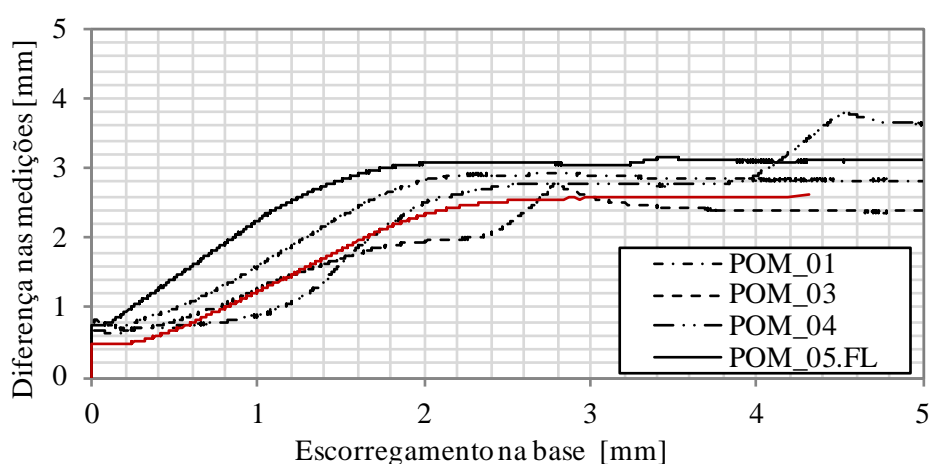


Figura 4.8: Evolução da diferença entre o deslocamento medido na base e o deslocamento na extremidade solicitada em função do escorregamento medido na base.

É possível observar que esta diferença tende para um valor constante, o que permite estimar a deformação instalada no cordão, pois o comprimento livre de cordão entre as zonas onde são efetuadas as medições é conhecido. De notar que esta deformação é um valor médio, pois a zona de cordão embebida tem menos deformação que a zona livre. Pode-se assim definir o comprimento de cordão que está a ser solicitado e livre de deformar. Este comprimento é igual à soma das parcelas relativas à zona aderente ($350mm$), à zona não aderente interior ao furo ($50mm$) e ainda com à zona livre entre a garra e a ancoragem propriamente dita ($100mm$), perfazendo um total de $500mm$. Para um alongamento do cordão na ordem dos $3mm$, tomando como exemplo a ancoragem POM_05.FL, calcula-se então uma deformação de $0,6\%$. Confirma-se que o cordão ainda se encontra em fase elástica de deformação. Este cálculo representa apenas uma estimativa e não a deformação real.

4.5 Tratamento dos resultados dos ensaios cíclicos

4.5.1 Validação dos resultados

Analogamente à validação dos resultados monotónicos, foi aplicado o mesmo método à análise das ancoragens ensaiadas ciclicamente onde, pela análise do intervalo de confiança da força de adesão, não se exclui nenhum dos ensaios (Figura 4.9).

Relativamente à ancoragem POC_05*.FL registaram-se, aquando da injeção da resina, duas observações determinantes para a compreensão dos resultados obtidos. Observou-se que este provete foi deficientemente injetado e que os fios do cordão se encontravam superficialmente oxidados. Hipoteticamente, a injeção deficiente da resina pode ser a causa de uma perda de resistência, enquanto a oxidação superficial pode aumentar em parte a resistência inicial da ancoragem, ou seja, a adesão. Este fenómeno deve-se provavelmente à maior rugosidade do cordão oxidado, o que faz com que este deixe de ser liso, consequentemente sendo capaz de mobilizar mais a capacidade resistente da resina.

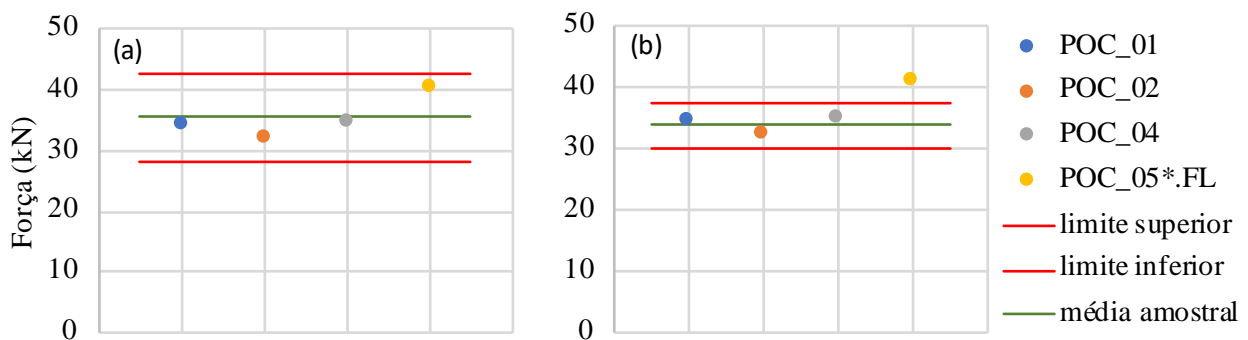


Figura 4.9: Intervalo de confiança de 99% para a força F_{ad} - (a) para todas as ancoragens; (b) para ancoragens aceites após exclusão dos *outliers*

Observando o gráfico dos ensaios cíclicos das ancoragens (Figura 4.3), a diferença de comportamento relativamente às outras ancoragens nota-se na componente da adesão, onde o provete POC_05*.FL tem uma maior resistência e também maior escorregamento entre ciclos. Este comportamento é indício de que o atrito na interface resina-aço é menor quando comparado com as restantes ancoragens. Podemos presumir que a injeção deficiente faz-se notar na força máxima mobilizada pelo sistema, enquanto a presença de oxidação superficial pode ter mais influência na adesão. Uma possível explicação para este fenómeno é que após determinado esforço, as micro-saliências da resina na zona oxidada do cordão sofrem rotura, e consequentemente, a ancoragem tem um comportamento com menor atrito, sintomático também de um menor comprimento aderente. Este efeito é abordado por Fernandes (2011).

No caso do provete POC_05*.FL, este não é excluída devido à força de adesão ser inferior às restantes, como no caso do provete POM_02*, mas sim devido ao facto de o escorregamento observado entre ciclos no ensaio deste provete ser muito superior ao escorregamento observado nos restantes. Esta análise ao escorregamento entre ciclos do provete POC_05*.FL, é corroborada pela análise da energia dissipada entre ciclos, como se pode observar na Figura 4.10.

A energia dissipada é obtida através do cálculo da área de cada gráfico. De modo a observar melhor o comportamento, o cálculo da energia dissipada por ciclo inicia-se quando a força atinge os 85kN, a força base dos ciclos, até ao valor máximo de cada ciclo. O método de cálculo é análogo ao método utilizado nas aproximações efetuadas, com base no método dos trapézios, com intervalos relativamente curtos.

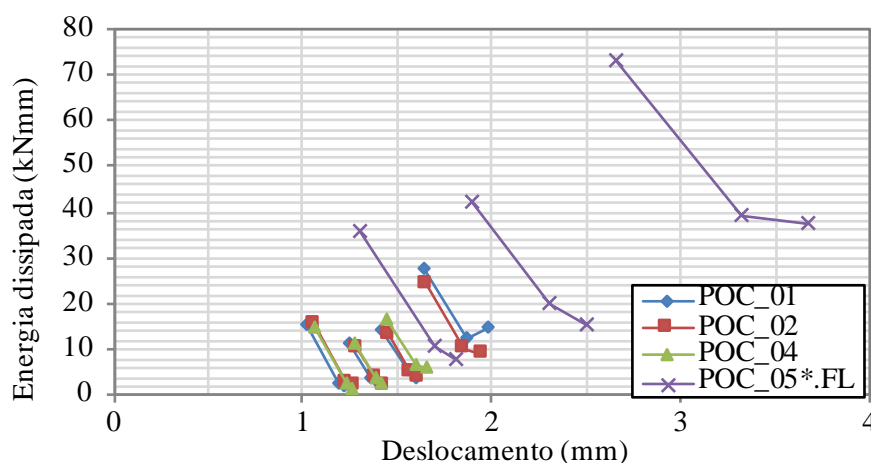


Figura 4.10: Energia dissipada em cada ancoragem em função do escorregamento medido na base em cada ciclo

Observando as Figuras 4.10 e 4.3 é de notar que as ancoragens POC_01, POC_02, POC_04 têm um comportamento muito similar.

De modo a concluir se a exclusão do provete POC_05*.FL é correta na análise posteriormente

efetuada, optou-se por analisar o intervalo de confiança de 99% da energia dissipada num determinado ciclo, em detrimento de analisar o intervalo de confiança da força de adesão. Escolhendo o primeiro ciclo como estudo probatório, esta análise, é análoga à efetuada para o intervalo de confiança da Figura 4.5, em que no gráfico (a) da Figura 4.11 são analisadas todas as ancoragens ensaiadas ciclicamente, enquanto no gráfico (b), apenas são analisadas as ancoragens não excluídas POC_01, POC_02 e POC_04.

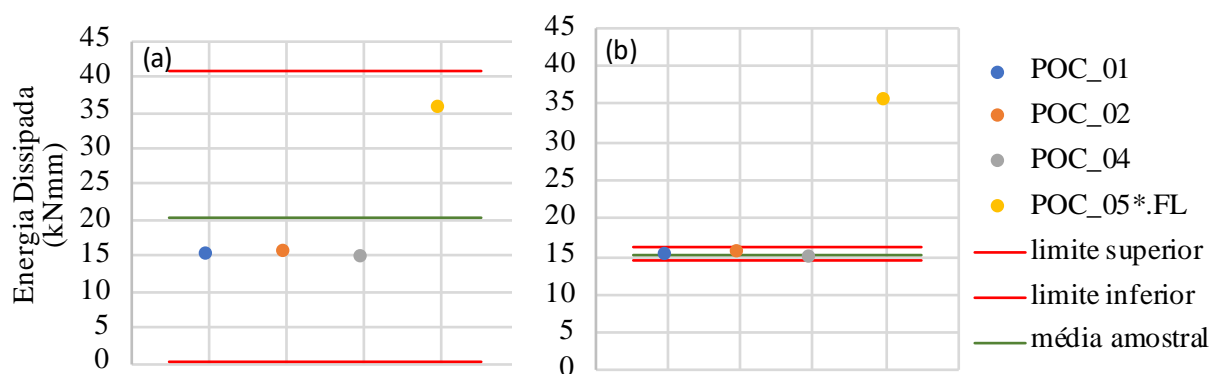


Figura 4.11: Intervalo de confiança de 99% para a energia dissipada no primeiro ciclo de cada ensaio cíclico - (a) para todas as ancoragens; (b) para ancoragens aceites após exclusão dos outliers

Note-se que, a não exclusão da ancoragem no gráfico (a) causa um intervalo de confiança que, como se verifica, é extremamente grande e irrealista, tendo como limite inferior do intervalo de confiança um valor bastante próximo de zero. Assim, optou-se por analisar o intervalo de confiança apenas com as três ancoragens com comportamentos similares, consideradas representativas da solução, e observar o posicionamento da ancoragem POC_05*.FL neste novo intervalo de confiança (Figura 4.11 (b)).

Como se observa na Figura 4.11, o valor do escorregamento medido na base da ancoragem POC_05*.FL é um *outlier* bastante deslocado deste novo intervalo de confiança (Figura 4.11 (b)). Ainda, este novo intervalo de confiança é bastante curto, sendo sinónimo de que, em termos energéticos, a solução é representativa do universo de ancoragens com as condições aplicadas neste estudo. Fica então fundamentada a hipótese de exclusão da ancoragem POC_05*.FL.

4.5.2 Critérios de seleção das aproximações efetuadas para os ensaios cíclicos

Com o objetivo de aproximar uma função ao comportamento real da ancoragem solicitada ciclicamente, adotou-se o mesmo método explicitado em 4.4.3, ou seja, a igualdade das áreas de cada gráfico, comparando a solicitação real com a aproximação, onde a força de adesão é a mesma em ambas as funções, real e aproximada. Assim, a título de exemplo ilustrativo, apresenta-se a

Figura 4.12, onde a aproximação efetuada com os ensaios cíclicos se assemelha à aproximação dos ensaios monotónicos.

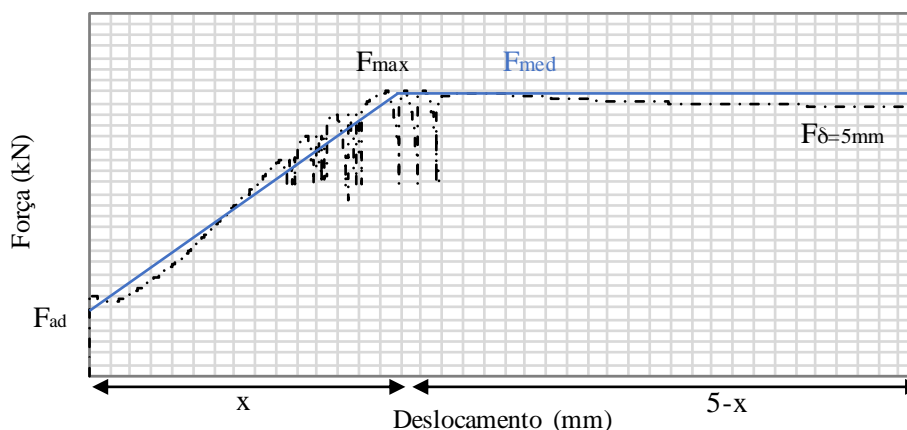


Figura 4.12: Ilustração genérica da aproximação da função real cíclica e definição das variáveis a analisar

A definição das variáveis é igual à atribuída aos ensaios monotónicos. No entanto é possível observar que a tentativa da definição do valor F_1 não é tão simples como no caso dos monotónicos. Assim, o valor que identifica a força a partir da qual se inicia a perda de rigidez da ligação não é tão fiável como no caso dos ensaios monotónicos.

4.5.3 Aproximações ao comportamento

Com o mesmo critério de aproximação às curvas dos ensaios monotónicos, apresentam-se no presente subcapítulo as aproximações aos ensaios cíclicos. Cada uma das aproximações adota a nomenclatura AEC_XX , onde XX representa a identificação associada a cada uma das ancoragens. À semelhança das aproximações dos ensaios monotónicos, apenas se apresentam as ancoragens que não foram excluídas na análise da admissibilidade. Pelo exposto, apresentam-se as aproximações efetuadas na Figura 4.13 onde os gráficos por ordem descendente representam a totalidade das aproximações e as aproximações individuais às ancoragens POC_01, POC_02 e POC_04.

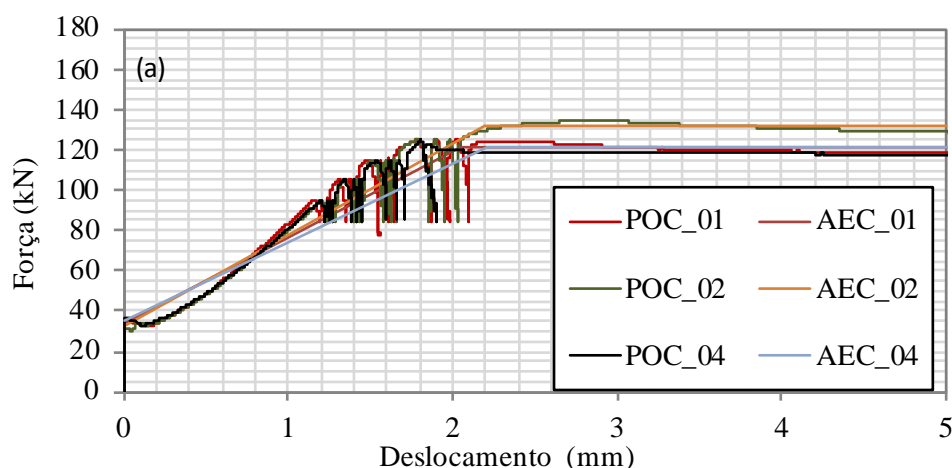


Figura 4.13: Representação das solicitações reais e as respectivas aproximações em regime cíclico

Para uma completa definição do comportamento das ancoragens, devem ser apresentados os valores utilizados para o cálculo das tensões de aderência e para a parametrização das aproximações efetuadas, bem como os valores adotados. De acordo com o método aplicado na apresentação dos resultados monotônicos e de modo a evidenciar os resultados inferidos a partir dos gráficos, expõem-se estes dados nas Tabelas 4.4 e 4.5. A primeira com os resultados dos ensaios realizados, enquanto a segunda relativa à aproximação efetuada, ambas em unidades de força (kN) e deslocamento (mm). É ainda possível observar que no gráfico correspondente à ancoragem POC_04, o último ciclo apresenta um comportamento diferente no deslocamento medido na base. Neste sentido, não se aplica nenhuma análise concreta à fase com comportamento diferente

Apresenta-se em primeiro lugar a Tabela 4.4, análoga à Tabela 4.1, com os valores obtidos para a força de adesão, força limite de rigidez, força máxima entre 0 e 5 mm, a força aos 5mm, e o valor do escorregamento associado.

Tabela 4.4: Valores de referência para ancoragens ensaiadas em regime cíclico.

Nome	$F_{ad}(kN)$	$F_1(kN)$	$\delta_{s,1}(mm)$	$F_{max[0;5mm]}(kN)$	$\delta_{max[0;5mm]}(mm)$	$F_{\delta=5mm}(kN)$
POC_01	34,28	115,00	1,48	125,00	1,79	118,36
POC_02	31,96	115,00	1,52	134,32	2,81	128,68
POC_04	34,84	115,00	1,54	125,00	1,81	117,44
Média	33,69	115,00	1,51	128,11	2,14	121,49
DAM	0,10	0,00	0,04	0,10	0,63	0,12

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores das aproximações efetuadas (AEC_01, AEC_02 e AEC_03). No caso deste tipo de ensaios, devido à presença dos ciclos, é extremamente difícil

percecionar o momento a partir do qual o ramo ascendente perde a linearidade da relação entre a força e o deslocamento medido na base da ancoragem. De modo a melhor perceber a dispersão dos resultados, são também apresentadas a média amostral e o desvio absoluto à média (DAM), tanto na Tabela 4.4 como na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Valores de referência das aproximações para cada ancoragem ensaiada em regime cíclico

Nome	$F_{ad}(kN)$	$F_{med}(kN)$	$\delta_{med}(mm)$
AEC_01	34,28	121,68	2,05
AEC_02	31,96	131,50	2,20
AEC_04	34,84	121,24	2,20
Média	33,69	124,81	2,15
DAM	0,10	0,11	0,09

A partir do desvio absoluto à média, é possível inferir qual a ordem de grandeza e significância do afastamento dos resultados obtidos ao valor médio destes. No caso da Tabela 4.5, o valor do desvio absoluto à média é de 0,1 e 0,11 para as forças de adesão e médias, e de 0,09 para o escorregamento associado à força F_{med} , respetivamente. Pode-se ainda calcular o erro relativo deste valor em relação à média dos resultados, obtendo-se para um desvio absoluto de 0,1, um erro relativo de apenas 0,31%.

4.5.4 Tensão de aderência

O processo de cálculo das tensões de aderência dos ensaios monotónicos é o idêntico ao que se adotou para os ensaios cíclicos. Assim, os valores da tensão de aderência apresentados na Tabela 4.6 são dados pela equação (4.2).

Tabela 4.6: Valores da tensão de aderência admitindo um modelo uniforme para o comportamento das ancoragens em regime cíclico

Nome	$\tau_{ad}(MPa)$	$\tau_1(MPa)$	$\tau_{med}(MPa)$	$\tau_{max[0-5mm]}(MPa)$	$\tau_{\delta=5mm}(MPa)$
POC_01	1,99	6,66	7,05	7,24	0,10
POC_02	1,85	6,66	7,62	7,78	0,16
POC_04	2,02	6,66	7,02	7,24	0,10
Média	1,95	6,66	7,23	7,42	0,12
DAM	0,10	0,00	0,11	0,10	0,63

4.5.5 Análise das medições efetuadas

Na análise do comportamento das ancoragens ensaiadas ciclicamente, devido à presença dos ciclos, não é possível seguir o procedimento adotado para os ensaios monotônicos. Entenda-se então a necessidade deste subcapítulo para efetuar uma análise por observação aos resultados obtidos nos ensaios cíclicos. A partir da Figura 4.13, é possível observar o deslocamento medido na base, verificando que o comportamento das três ancoragens consideradas como representativas da solução em estudo é bastante similar.

A análise efetuada ao comportamento incidiu sobre energia dissipada por ciclo. Esta foi calculada, e exposta em gráfico para melhor observação e compreensão. É de notar, na Figura 4.14, a proximidade do comportamento das ancoragens POC_01, POC_02, POC_04 relativamente ao afastamento da ancoragem POC_05*.FL.

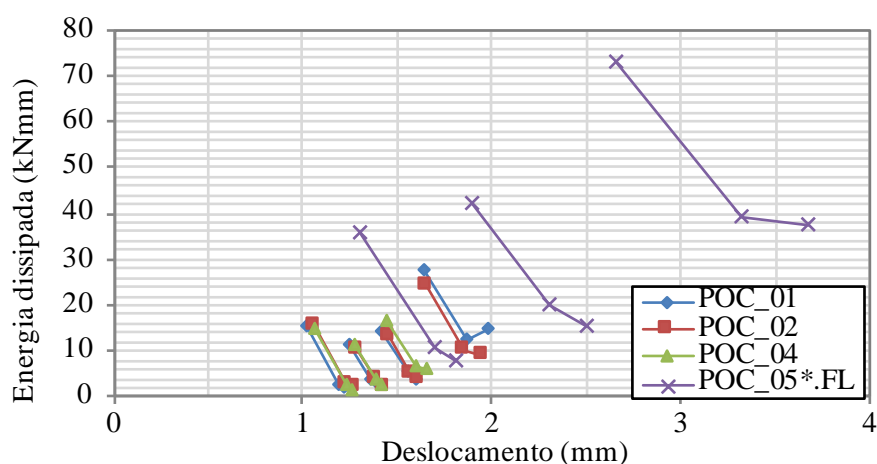


Figura 4.14: Energia dissipada em cada ancoragem em função do escorregamento medido na base em cada ciclo

Ainda relativamente à Figura 4.14, expõem-se os resultados da energia dissipada por ciclo, bem como a média das ancoragens aceites, e o desvio absoluto destes à média. Comparativamente analisa-se o desvio da ancoragem POC_05*.FL relativamente às restantes ancoragens. Entenda-se por patamares os ciclos entre dois patamares de carga. Tomando como exemplo, o primeiro patamar dos ciclos é relativo à força entre 85kN e 95kN, o segundo entre 85 e 105, consecutivamente até ao quarto patamar. Estes patamares e ciclos podem ser melhor observados no capítulo 3.4.2.

Tabela 4.7: Valores da energia dissipada por ciclo e por patamar; média e desvio absoluto à média (DAM) das três primeiras ancoragens

		POC_01 (kNmm)	POC_02 (kNmm)	POC_04 (kNmm)	Média (kNmm)	DAM
Patamar 1	ciclo 1	15,20	15,62	14,84	15,22	0,05
	ciclo 2	2,78	2,78	2,62	2,73	0,08
	ciclo 3	1,83	1,83	1,58	1,74	0,19
Patamar 2	ciclo 1	11,32	10,29	11,41	11,01	0,13
	ciclo 2	3,92	3,56	3,64	3,71	0,12
	ciclo 3	2,59	2,23	2,57	2,46	0,19
Patamar 3	ciclo 1	14,25	13,09	16,62	14,65	0,27
	ciclo 2	5,32	4,93	6,54	5,60	0,34
	ciclo 3	3,97	3,81	5,80	4,53	0,56
Patamar 4	ciclo 1	27,55	24,27	22,01	24,61	0,24
	ciclo 2	12,30	10,24	x	11,27	0,18
	ciclo 3	14,56	8,85	x	11,70	0,49

A análise dos resultados permite verificar que o desvio absoluto à média das três primeiras ancoragens é de apenas 0,08, o que representa aproximadamente 0,02%. O erro relativo da ancoragem POC_05*.FL à média, em termos da energia dissipada entre os 0mm e os 5mm, é de 15%. Este é bem mais expressivo, do que o erro relativo de cada uma das restantes ancoragens à média, que toma os valores de 1,3%, 4,1% e 2,8%, respetivamente às ancoragens POC_01, POC_02 e POC_04.

Observando-se ainda que a energia dissipada por cada ciclo nas três primeiras ancoragens é bastante inferior à energia dissipada pela ancoragem POC_05*.FL.

4.6 Análise comparativa dos resultados

4.6.1 Introdução

Terminado a exposição de todos os resultados, apresenta-se neste subcapítulo a análise comparativa dos resultados obtidos, entre os próprios, e com os resultados obtidos no estudo desenvolvido por Faria (2011). Inicialmente, a abordagem efetuada é relativa às forças obtidas em ambos os ensaios, e à energia dissipada entre os 0 e os 5mm. Também será apresentada a curva envolvente, e observar-se-á como esta se assemelha ao comportamento dos ensaios cíclicos. Será também analisada a diferença dos ensaios realizados em controlo de deslocamento e em controlo de força, e que implicações este fator tem nos resultados obtidos.

4.6.2 Comparação de forças e energia dissipada

Apresenta-se na Tabela 4.8 a totalidade da energia dissipada entre os 0 e os 5 milímetros e as forças obtidas em cada ensaio monotônico, presentes nas Tabelas 4.1 e 4.4. Apenas são analisados dados considerados conformes com a solução em estudo.

A energia dissipada nos ensaios cíclicos encontra-se na Tabela 4.7, e a energia dissipada nos ensaios monotônicos apresenta-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Energia dissipada entre os 0 e 5 milímetros nos ensaios monotônicos, a sua média e o desvio absoluto à média

POM_01 (kNmm)	POM_02* (kNmm)	POM_03 (kNmm)	POM_04 (kNmm)	POM_05.FL (kNmm)	POM_FC (kNmm)
610,37	360,80	442,55	480,06	539,04	537,40
Média				495,04	
DAM				0,81	

A análise dos resultados permite concluir que a energia dissipada nos ensaios cíclicos, como esperado, é superior em 6,34% à energia dissipada nos ensaios monotônicos. Esta diferença é no entanto, pouco expressiva, tendo em conta a ordem de grandeza dos valores da energia dissipada. Comparativamente aos resultados da força e do deslocamento, apresentam-se duas tabelas com os erros relativos da diferença entre cada tipo de ensaio, monotônico e cíclico.

Tabela 4.9: Comparação das diferentes forças obtidas em cada ensaio

Tipo	F_{ad} (kN)	F_1 (kN)	$F_{max[0;5mm]}$ (kN)	$F_{\delta=5mm}$ (kN)	F_{med} (kN)
Monotônicos	33,47	108,27	127,28	122,16	123,53
cíclicos	33,69	115,00	128,11	121,49	124,81
erro relativo	0,66%	5,85%	0,64%	0,55%	1,02%

Tabela 4.10: Resultados dos deslocamentos relativos às forças obtidas em cada ensaio, e respetivos erros relativos

Tipo	δ_1 (mm)	$\delta_{F_{max[0;5mm]}}$ (mm)	δ_{med} (mm)
Monotônicos	1,55	2,82	2,09
cíclicos	1,51	2,14	2,15
erro relativo	2,57%	31,88%	2,80%

Pela observação das tabelas é de notar que, comparando os dois tipos de ensaio, monotônico

e cíclico, os erros relativos são praticamente insignificantes, iguais ou inferiores a 1% quando se analisam as forças F_{ad} , $F_{max[0;5mm]}$, $F_{\delta=5mm}$ e F_{med} . Para o escorregamento médio observado em cada um do tipo de ensaios, o erro relativo é superior. Este fenómeno pode dever-se ao facto de o deslocamento associado a um determinado valor de força divergir em maior grau em cada ensaio.

4.6.3 Envolvente

A partir da média dos ensaios monotónicos conformes, obteve-se uma curva de comportamento, a qual irá ser comparada, por observação, relativamente às restantes tanto dos ensaios monotónicos como dos ensaios cíclicos. Na Figura 4.15 apresenta-se assim a curva envolvente, juntamente com os ensaios monotónicos. Na Figura 4.16 apresenta-se a mesma curva com os ensaios cíclicos e com as aproximações de todos os ensaios. Ainda foi efetuado um intervalo de 25% superior e inferior à envolvente, denominado como limite superior e inferior, criado de modo a observar o ajustamento dos resultados. Apresenta-se também esta mesma curva envolvente, comparando com os ensaios cíclicos.

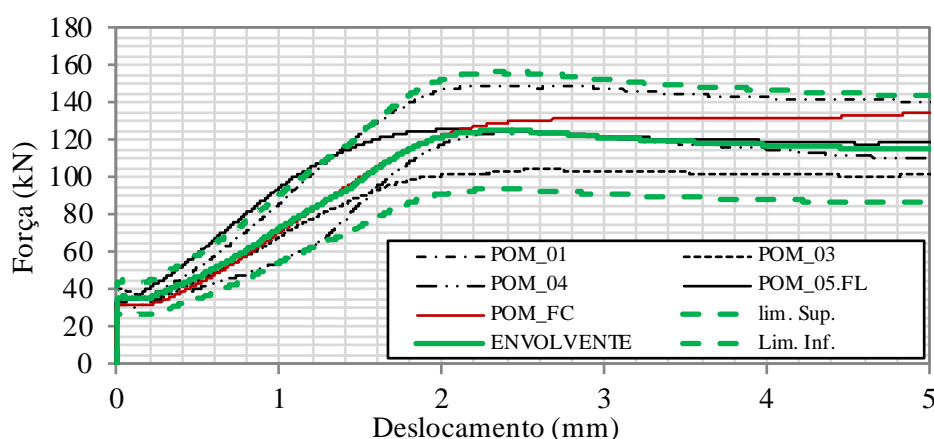


Figura 4.15: Adaptação da curva envolvente aos ensaios monotónicos, com limites superior e inferior

É notório que todos os ensaios apresentados se encontram dentro do intervalo dos limites superior e inferior da envolvente. Na Figura 4.15 apenas a ancoragem POM_05.FL se encontra ligeiramente fora deste intervalo na zona entre os 0,2 e os 1,4 mm de escorregamento na base. Devido a esta diferença ser tão ligeira, não se tecem considerações sobre este facto. Na Figura 4.16 todos os ensaios conformes encontram-se também dentro do intervalo criado pelos limites superior e inferior da curva envolvente.

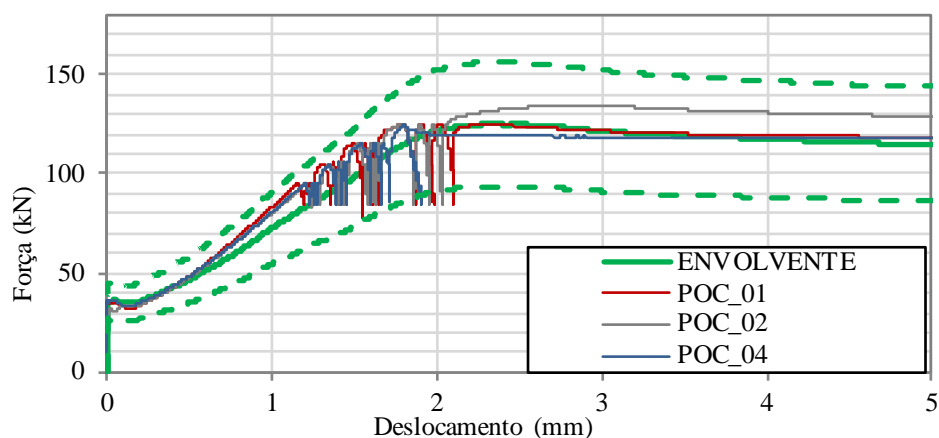


Figura 4.16: Adaptação da curva envolvente aos ensaios cíclicos, com limites superior e inferior

4.6.4 Aproximações

No presente subcapítulo, na Figura 4.17, é possível observar a curva envolvente e como esta se relaciona com as aproximações efetuadas. Apesar de ser difícil identificar as aproximações, é de notar que todas estão dentro do intervalo criado entre o limite superior e inferior.

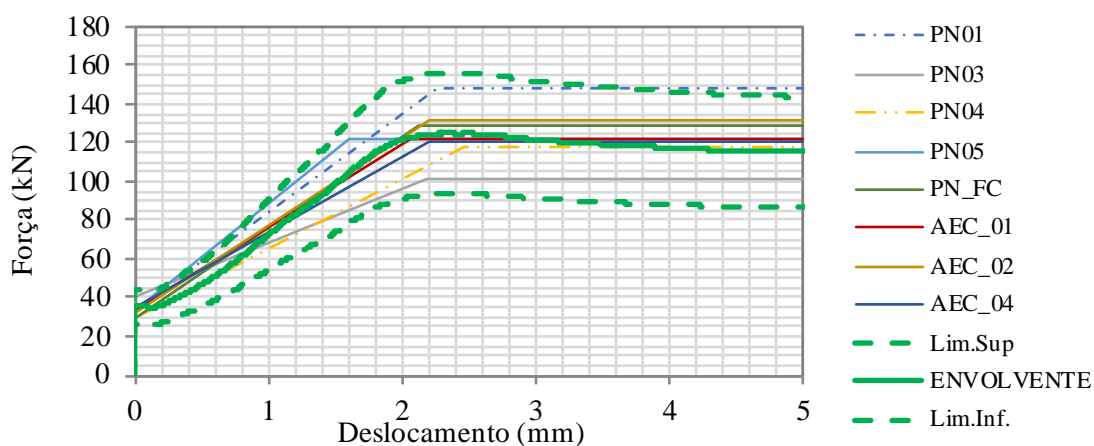


Figura 4.17: Adaptação da curva envolvente às aproximações dos ensaios cíclicos e dos monotónicos, com limites superior e inferior da envolvente

4.6.5 Ensaio em controlo de deslocamento vs. controlo de força

Como referido anteriormente, um dos ensaios efetuados foi controlado em função da força em oposição aos restantes que foram ensaiados em controlo de deslocamento. Fisicamente existem

diferenças, que condicionam o tipo de observações possíveis de efetuar. Devido à suscetibilidade do atrito com a variação da velocidade, como notado acima, esta influencia diretamente a força resistente da ancoragem. Por este motivo optou-se por fazer os ensaios em controlo de deslocamento. Durante os ensaios, e devido à discrepância dos resultados quando comparados com Faria (2011), optou-se por, após a realização de um número de ensaios significativo, ensaiar uma das ancoragens em controlo de força de modo a poder comparar com os ensaios de Faria (2011).

Na Figura 4.18 apresentam-se dois gráficos em escalas de escorregamento diferentes, a envolvente e o ensaio em controlo de força. As principais diferenças são que, no caso da envolvente existem zonas em que a ancoragem após deslizar, quando perde a componente da adesão, adapta-se à nova posição apresentando um decréscimo da força instalada. Ao invés, o provete POM_FC, apresenta sempre um acréscimo da força instalada na ancoragem, característico dos ensaios em controlo de força. As duas zonas onde é visível esta perda de força por adaptação à posição, por parte das ancoragens ensaiadas em controlo de deslocamento (envolvente), são no início do escorregamento após a perda da componente da adesão, e após o momento da perda de rigidez do sistema, após se ter atingido a máxima resistência mecânica, nomeadamente entre os 0 e os 0,2 milímetros, e na zona dos 2 milímetros. Ainda, é possível observar que ambos os ensaios chegam à mesma resistência, apesar de um ser após uma grande deformação enquanto no outro, a deformação para atingir as forças máximas é bastante menor, comparativamente, mas ainda excessivamente grande para o tipo de aplicação que se pretende de uma ancoragem de pré-esforço pós-instalada.

Esta diferença observada indicia que, num caso real onde exista uma deformação que solicite a ancoragem adesiva, esta solicitação pode provocar um escorregamento que origina uma perda de força e consequente perda de rigidez da ligação.

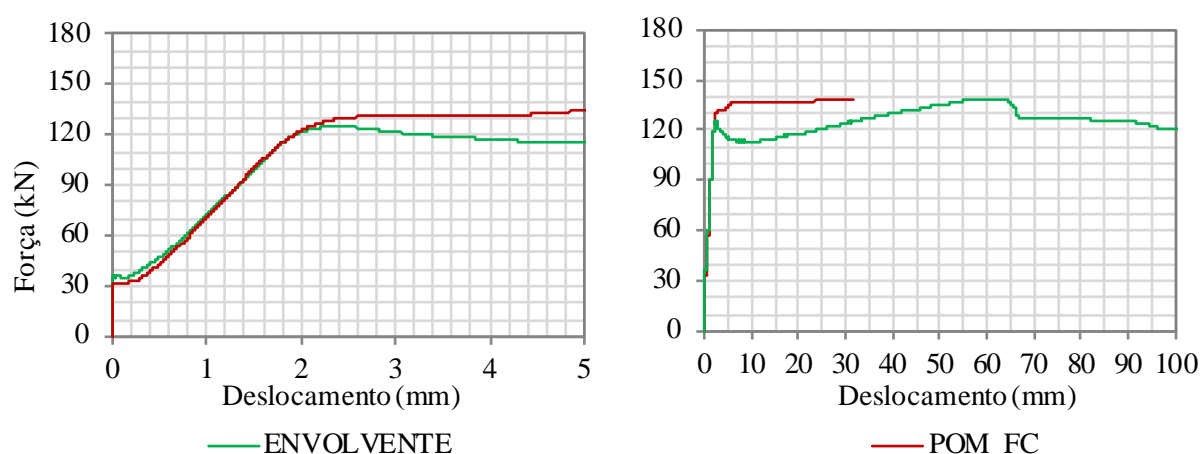


Figura 4.18: Comparação da envolvente em controlo de deslocamento com o ensaio em controlo de força.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Considerações gerais

A aderência é um fenómeno de grande importância no comportamento de ancoragens, principalmente no comportamento de ancoragens adesivas. No presente documento estudou-se o desempenho de uma ancoragem, inserida no contexto do estudo efetuado pela Engenheira Helisa Muhaj, que visa reforçar uma ligação genérica viga-pilar sujeita a ações alternadas. O presente estudo serve para um melhor entendimento dos fenómenos existentes no comportamento da resposta de uma ancoragem face aos estímulos aplicados.

No sentido de estudar a influência dos erros provenientes das dificuldades de execução e do tipo de ensaio efetuado, bem como de compreender a sua influência no comportamento, e ainda estudar o comportamento numa solicitação cíclica, o presente estudo foi programado com ensaios monotónicos e cíclicos, em controlo de deslocamento. Por forma a comparar os resultados deste estudo com outros trabalhos de investigação, foi também realizado também um ensaio em controlo de força.

O programa experimental executado baseia-se na solicitação cíclica e monotónica de cinco ancoragens para cada solicitação. Cada ancoragem tem uma zona aderente, de 35 cm, a um cordão de pré-esforço com diâmetro nominal de 15,7 mm.

A exposição escrita e observação de todos os acontecimentos durante a execução das ancoragens, nomeadamente as características dos materiais, a execução da injeção, a calibração de todos os sistemas e os tipos de ensaios efetuados permitem retirar conclusões fundamentadas, com relacionamento efeito-causa. Ainda permite que sejam tecidas recomendações para trabalhos futuros, para que não haja repetição de erros.

Esta campanha experimental, apesar de reduzida e de se terem verificado alguns problemas na execução, foi fundamental na perceção das dificuldades que poderão existir aquando da aplicação

desta solução num caso real.

5.2 Conclusões

As principais conclusões que são possíveis de retirar do presente estudo, estão diretamente ligadas à execução, ao tipo de ancoragem ensaiada e ao tipo de ensaio aplicado. Pela observação dos aspetos analisados, conclui-se que é absolutamente crítico que se consiga garantir uma boa execução, e que esta seja eficaz. Os resultados demonstram que a mínima diferença na execução, ou nas características dos materiais utilizados tem uma influência direta no comportamento da ancoragem. As principais características que indiciam uma alteração significativa do comportamento, são a oxidação superficial do cordão de pré-esforço e o controlo eficaz da injeção da resina. A oxidação superficial dá indícios de poder aumentar a componente da adesão, devido à micro rugosidade criada pela oxidação, e criar melhor aderência à resina, mas numa fase posterior após o destacamento das micro-saliências da resina, esta pode perder grande parte da resistência mecânica devido à regularização da interface resina-aço. Relativamente ao controlo de injeção da resina, este é um aspeto fundamental, pois o comprimento aderente está, naturalmente, diretamente ligado à capacidade resistente. Assim, aconselha-se que para uma boa injeção o diâmetro do furo comparativamente ao do cordão deva ser suficiente para colocar um tubo injetor, que permita uma correta injeção.

Comparando os dois tipos de ensaio, monotónico e cíclico, observa-se que aparentemente os resultados indiciam não existir uma grande degradação da ligação quando solicitada em regime cíclico comparativamente a uma solicitação monotónica.

Ainda é possível retirar ilações comparando os ensaios em controlo de deslocamento quando comparados com os ensaios em controlo de força. É plausível, observando o estudo em causa, assumir que ambos os controlos de ensaio das ancoragens, no limite, atingem a mesma capacidade resistente, pelo que se considera fundamental a reprodução mais semelhante possível da solicitação real a que a ancoragem estará sujeita. A grande diferença observada, comparando ensaio de força e de deslocamento, e que permite fazer um apontamento de grande importância, é o facto de que caso a solicitação num caso prático se comporte como um ensaio em controlo de deslocamento, após determinada força transmitida, o cordão pode deslizar e acomodar-se à nova posição, podendo o elemento reforçado perder alguma capacidade resistente.

Pelo exposto conclui-se que a homogeneização da boa execução é fundamental, bem como o sucesso desta para a reprodução do efeito pretendido. O controlo dos materiais, e da execução só por si não garantem que não ocorram erros previstos, como por exemplo a injeção da resina.

5.3 Recomendações de trabalhos futuros

Em virtude dos factos mencionados, tecem-se algumas recomendações que se consideram fundamentais para um melhor entendimento do tema em estudo e para a mitigação de erros no processo. Salientam-se também alguns aspetos que visam o estudo de fenómenos que não ficaram provados.

Neste sentido aconselha-se a implementação de um procedimento exato e inteligível, de modo a poder replicar os resultados e obter uma solução mais fiável. Ainda neste âmbito, considera-se importante explorar o comportamento em regime cíclico e avaliar o desempenho da ligação neste regime, através de um programa experimental mais extenso, de modo a ser possível obter conclusões mais significativas para este tipo de solicitação, nomeadamente, quantos ciclos pode esta ligação suportar e se o seu desempenho é compatível com o que se considera um bom desempenho face à ação sísmica.

Importa também garantir a adequabilidade de um modelo teórico, capaz de reproduzir com exatidão os resultados que se pretendem obter de modo a poder dimensionar corretamente a ancoragem desejada.

A avaliação das condições dos cordões de pré-esforço, principalmente as alterações na superfície que, como indicado, o efeito da presença de rugosidade pode causar um grande impacto no resultado obtido, fundamentalmente na componente da adesão e da interação aço-resina.

A procura de novas soluções construtivas requer um extenso programa de estudos de modo a utilizar o método científico para o melhor resultado possível, criando tentativas, documentando os resultados e problemas encontrados, contribuindo assim para uma base de conhecimento, de modo a avançar no desenvolvimento das soluções sem estar a repetir erros desnecessários.

Referências bibliográficas

- EN 10204 (2004). *Metallic Products - Types of inspection documents*. European Committee for Standardization.
- EN 12390-1 (2012). *Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*. IPQ (instituto Português da Qualidade).
- EN 12390-2 (2009). *Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*. IPQ (instituto Português da Qualidade).
- EN 12390-3 (2011). *Resistência à compressão de provetes*. IPQ (instituto Português da Qualidade).
- EN 12390-6 (2011). *Resistência à tracção por compressão de provetes*. IPQ (instituto Português da Qualidade).
- EN 15630-3 (2010). *Steel for Reinforcement and Prestressing of Concrete*, volume 3. IPQ (instituto Português da Qualidade).
- NP EN 1992-1-1 (2010). Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. *IPQ (Instituto Português da Qualidade)*.
- ISO 7500-1 (2009). Verification of static uniaxial testing machines. tension/compression testing machines. verification and calibration of the force-measuring system. *Metallic materials*.
- NP EN 206-1 (2007). 2007: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Technical report, IPQ (Instituto Português da Qualidade).
- ACI Committee 318-08 (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*. American Concrete Institute.
- Abrishami, H.; e Mitchell, D. (1993). Bond characteristics of pretensioned strand. *ACI Materials Journal*, 90(3):228–235.
- Barnes, R. W., Grove, J. W., and Burns, N. H. (2003). Experimental assessment of factors affecting transfer length. *Structural Journal*, 100(6):740–748.
- Burke, S. (2001). Missing values, outliers, robust statistics & non-parametric methods. *LC-GC Europe Online Supplement, Statistics & Data Analysis*, 2(0):19–24.

- Cook, R., Bishop, M., Hagedoorn, H., Sikes, D., Richardson, D., Adams, T., and De Zee, C. (1994). Adhesive bonded anchors: Bond properties and effects of in-service and installation conditions.
- Cook, R. A. (1993). Behavior of chemically bonded anchors. *Journal of Structural Engineering*, 119(9):2744–2762.
- Cook, R. A. and Konz, R. C. (2001). Factors influencing bond strength of adhesive anchors. *Structural Journal*, 98(1):76–86.
- Cook, R. A., Konz, R. C., and Richardson, D. S. (1996). Adhesive-bonded anchors and dowels.
- Cook, R. A., Kunz, J., Fuchs, W., and Konz, R. C. (1998). Behavior and design of single adhesive anchors under tensile load in uncracked concrete. *ACI Structural Journal*, 95(1):9–26.
- Cousins, T. E., Johnston, D. W., and Zia, P. (1990a). Development length of epoxy-coated prestressing strand. *Materials Journal*, 87(4):309–318.
- Cousins, T. E., Johnston, D. W., and Zia, P. (1990b). Transfer and development length of epoxy coated and uncoated prestressing strand. *PCI JOURNAL*, 35(4):92–103.
- Eligehausen, R. and Balogh, T. (1995). Behavior of fasteners loaded in tension in cracked reinforced concrete. *Structural Journal*, 92(3):365–379.
- Eligehausen, R., Cook, R. A., and Appl, J. (2006a). Behavior and design of adhesive bonded anchors. *ACI Structural Journal*, 103(6):822.
- Eligehausen, R., Mallée, R., and Silva, J. F. (2006b). *Anchorage in concrete construction*, volume 10. John Wiley & Sons.
- Eligehausen, R., Popov, E. P., and Bertero, V. V. (1982). Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations.
- Faria, D. (2011). *Reforço de Lajes de Betão Armado usando Pós-Tensão com Ancoragens por Aderência*. PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.
- Faria, D., Lúcio, V., and Ramos, A. (2012). Reforço de lajes com recurso a pós-tensão com ancoragens por aderência. *Encontro Nacional Betão Estrutural*.
- Fernandes, H. D. P. (2011). *Sistemas de ancoragem de cordões de aço de alta resistência por aderência*. PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- FIB (2000). Bond of reinforcement in concrete: state-of-art report. *Bulletin*, 10.
- Janney, J. R. (1954). Nature of bond in pre-tensioned prestressed concrete. In *Journal Proceedings*, volume 50, pages 717–736.
- Laldji, S. (1987). *Bond characteristics of prestressing strand in grout*. PhD thesis, University of Leicester.

- Louro, Ana S. (2014). *Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas*. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Model Code 2010. (2012). First complete draft. FIB Bulletin 55 and 56.
- MonoTop-612. (2011). *Argamassa de reparação monocomponente à base de cimento com resinas sintéticas, sílica de fumo e reforçada com fibras*. Sika Portugal.
- PCM. (1995). 8: Method of test for flexural strength and deflection of polymer-modified mortar. *TC*, 113. RILEM
- Pereira, Z. L. e Requeijo, J. G. (2008). Qualidade: Planeamento e controlo estatístico de processos. *Fundamentos do Desenho de Experiências, 1a edição, Prefácio, Caparica*.
- T. Zenk, M. R. (2017). Injection system hilti hit-re 500 v3. Technical report, Hilti Corporation.